

COMENTARIOS SOBRE EL PROYECTO DE AUTOPISTAS (II)

Por JAVIER GOIZUETA NAVARRO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Oficina Regional de Proyectos (Oviedo)

Concluye el autor su interesante trabajo sobre el proyecto geométrico de autopistas dedicando especial atención a la elección del peralte e influencias del ancho de la mediana en las condiciones de seguridad de la vía. Su profundo estudio de las normas extranjeras, conjugado con la impresión personal, confieren notable valor a este artículo sobre tema tan importante en nuestro actual desarrollo vial.

Se estudian las dimensiones de la sección transversal haciendo especial hincapié en el ancho de mediana, magnitud muy importante en lo que se refiere a los graves accidentes debidos al paso de una calzada a otra.

Se complementa este trabajo con unas notas sobre las curvas en S de enlace entre curvas circulares, así como los diagramas de curvatura correspondientes a los diversos tipos de transición entre curvas circulares.

En la primera parte de este trabajo obtuvimos una relación entre los radios de las curvas vertical y horizontal y el peralte, que era:

$$\frac{R_v}{R_H} = \frac{\varphi \left(\frac{\sin \varphi - \frac{\varphi}{2}}{1 - \cos \varphi} \right)}{p + \frac{1,2}{R_H(1 - \cos \varphi)}}$$

En la cual, R_v = radio de la curva vertical; R_H = radio de la curva horizontal; p = peralte; φ = ángulo horizontal entre la posición del automovilista y el punto en que se pierde la visibilidad.

En el caso de que no se pueda aplicar la expresión $R_v = \frac{R_H}{p}$ que, como hemos visto, es suficiente para no perder la visibilidad en perfil, habrá que analizar para distintos ángulos φ los valores que se obtienen de R_v y elegir el máximo o por lo menos, el máximo que corresponda al desarrollo de la curva horizontal considerada.

Para poder aplicar esta fórmula, es necesario conocer el valor del peralte adoptado, y éste es el estudio que hacemos a continuación, con lo cual tendremos fórmulas que nos relacionen las magnitudes que nos definen la autopista en sus tres dimensiones.

El método elegido para el análisis de peraltes coincide, fundamentalmente, con el adoptado en Estados Unidos por la A. A. S. H. O, que nos parece muy racional; para extrapolarlo a España de manera rigurosa habría que analizar la distribución de velocidades de los vehículos en España en tramos donde los vehículos pudiesen elegir su velocidad; no existiendo, que nosotros sepamos, ningún análisis de este tipo en nuestro país, la distribución de velocidades adoptada, coin-

cide con la estudiada en Estados Unidos y descrita en el libro *A Policy on Geometric Design of Rural Highways*, de 1957. Hay que hacer constar que en la nueva publicación de 1965 se considera una distribución de velocidad mayor, lo que nos hace pensar que, lógicamente, las velocidades deseadas por los vehículos aumentan con el tiempo, lo cual puede ser debido a la evolución en la fabricación de automóviles. Esto nos podría hacer pensar en velocidades mayores de las que realmente se dan hoy; sin embargo, se puede suponer que esta evolución queda compensada por el hecho de que el nivel de servicio de la autopista va disminuyendo también con el tiempo debido al aumento de tráfico.

1. PERALTES

1.1. Velocidad específica.

La primera magnitud que se fija al concebir un trazado de carretera o autopista, es la velocidad específica que se define como la velocidad máxima a la que se puede circular con seguridad; de esta magnitud salen todas las demás, como

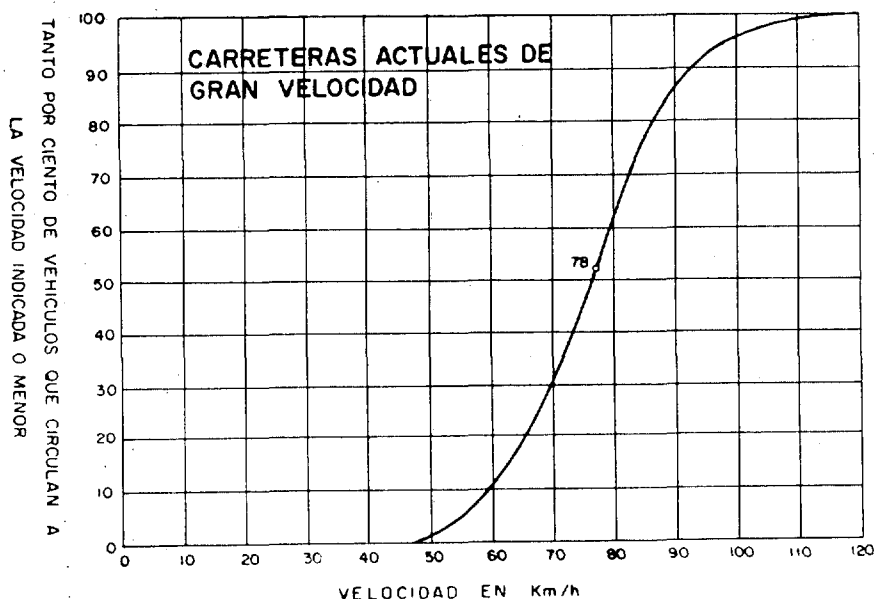


Fig. 1-a. — Reparto de frecuencia de velocidades en carretera de gran velocidad.

son radios mínimos, peraltes, pendientes máximas, etc. Hablando de autopistas se pueden establecer diversas categorías que dependen de la velocidad específica que se considera; en Alemania se habían establecido cuatro clases, siendo las velocidades básicas 160, 140, 120 y 100 Km./h., respectivamente (pág. 135 del libro de Neumann, *Carreteras modernas*). Los franceses consideran dos clases, las de $V = 100$ Km./h. y $V = 140$ Km./h.; las normas de la A. A. S. H. O. han experimentado un cambio notable en los últimos años; efectivamente, antes considera-

ban una velocidad específica máxima de 70 millas por hora, mientras que en la actualidad llegan hasta 85 millas por hora.

La figura 1-a representa la distribución de velocidades en el caso de circulación libre; la figura 1-b está deducida de la 1-a y representa un gráfico de frecuencias de velocidades.

Según vemos, la velocidad media, y a la vez la más frecuente, es de 80 kilómetros/h.; se ha observado que, en algunas autopistas, la velocidad media es de 93 Km./h., pero esto sucede en casos muy particulares; la conclusión que se ob-

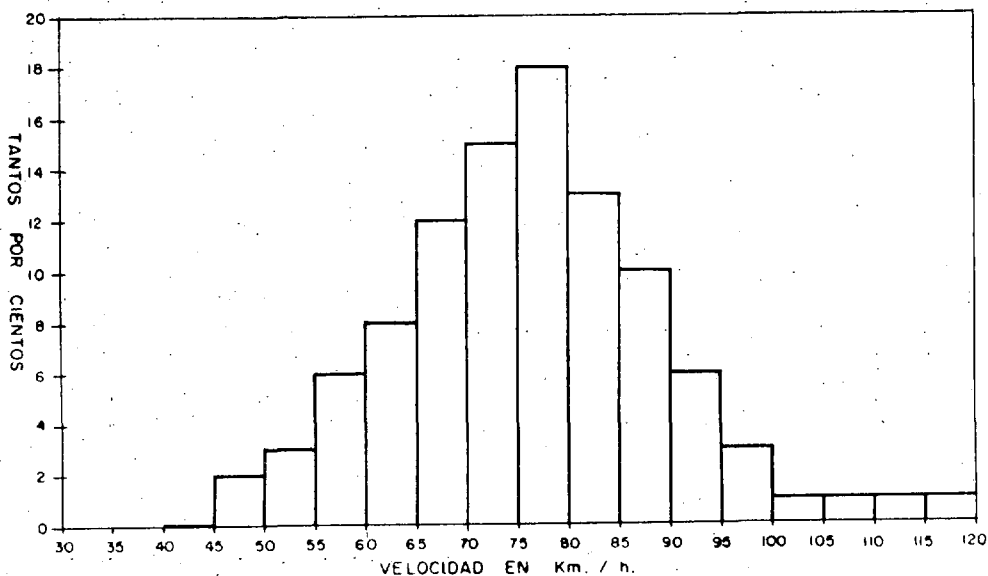


Figura 1-b.

tiene de la figura 1 es que los conductores no desean circular a velocidades que alcancen ni siquiera se aproximen a las velocidades máximas de que son capaces sus vehículos; estas curvas proceden de experiencias hechas en Estados Unidos, en que el tanto por ciento de vehículos pesados es muy pequeño con relación a España.

1.2. Rozamiento.

También en Estados Unidos se han hecho estudios sobre coeficientes de rozamiento entre coche y carretera; todos los investigadores están de acuerdo en que el rozamiento disponible disminuye al aumentar la velocidad; estiman dichos autores que para velocidades superiores a 110 Km./h. no se debe exigir más de 0,10 a 0,12 al coeficiente de rozamiento, y que valores superiores provocan sensación de incomodidad; para 40 millas por hora, el coeficiente exigible es de 0,16; la distribución de rozamientos máximos admisibles se da en la figura 2.

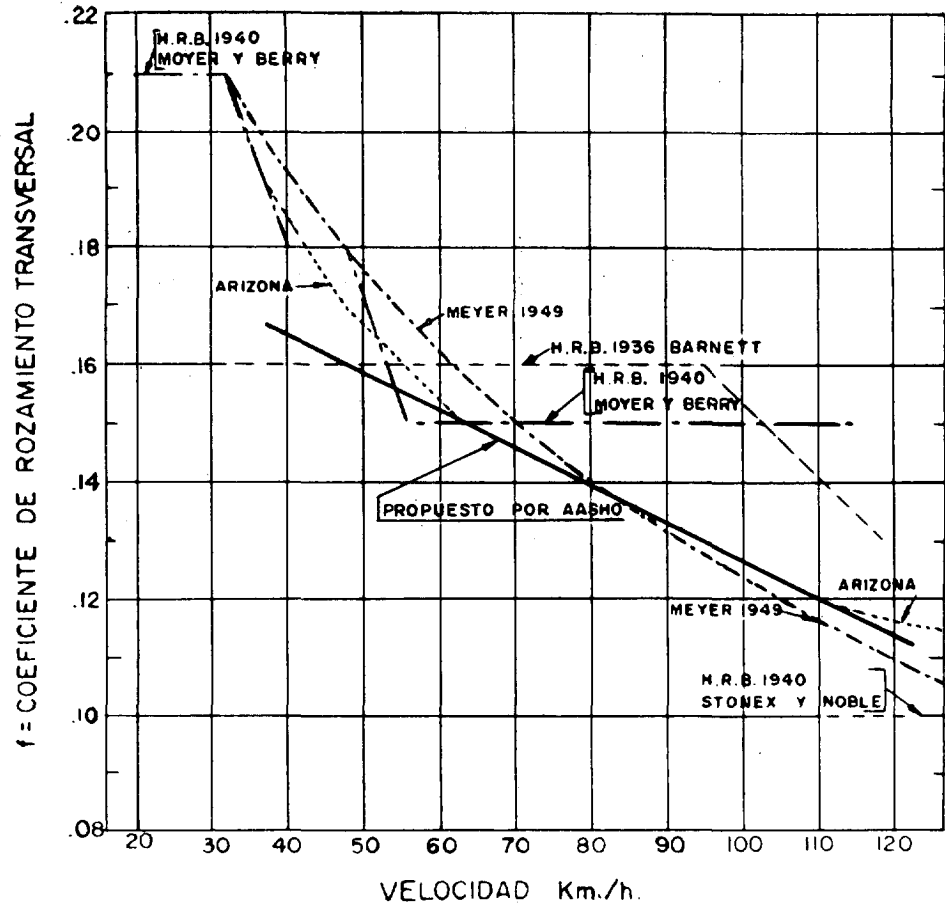


Fig. 2. — Coeficientes de rozamientos máximos para circular con seguridad.

1.3. Peralte máximo y radio mínimo absoluto.

En cada caso particular se ha de fijar el peralte máximo admitido; esta cantidad depende de circunstancias locales y propias de cada autopista en particular; por ejemplo, en autopistas a realizar en zonas donde hay peligro de helada, el peralte máximo será pequeño; en autopistas en zona rural, donde no sean de prever aglomeraciones, el peralte máximo puede llegar hasta 0,12; en autopistas urbanas se debe considerar menor; en autopistas rurales, tramos de fuerte pendiente, quizá lo que se debe fijar es la línea de máxima pendiente; en nuestro caso vamos a considerar 0,12 como peralte máximo admitido y haremos todas las consideraciones a partir de este peralte, indicando que cualquiera que fuese el peralte máximo admitido el estudio se haría igual.

Al fijar 0,12 como peralte máximo podemos obtener el radio mínimo que se debe proyectar para velocidad específica de 120 Km./h.; en efecto, se ha de verificar que los vehículos han de circular con seguridad por una circunferencia de radio R a 120 Km./h.; quiere esto decir que el máximo coeficiente de rozamiento será 0,12 y, por tanto, $127 R (0,12 + 0,12) = 120^2$.

$$R = \frac{120^2}{127 \times 0,24} = 475 \text{ m.}$$

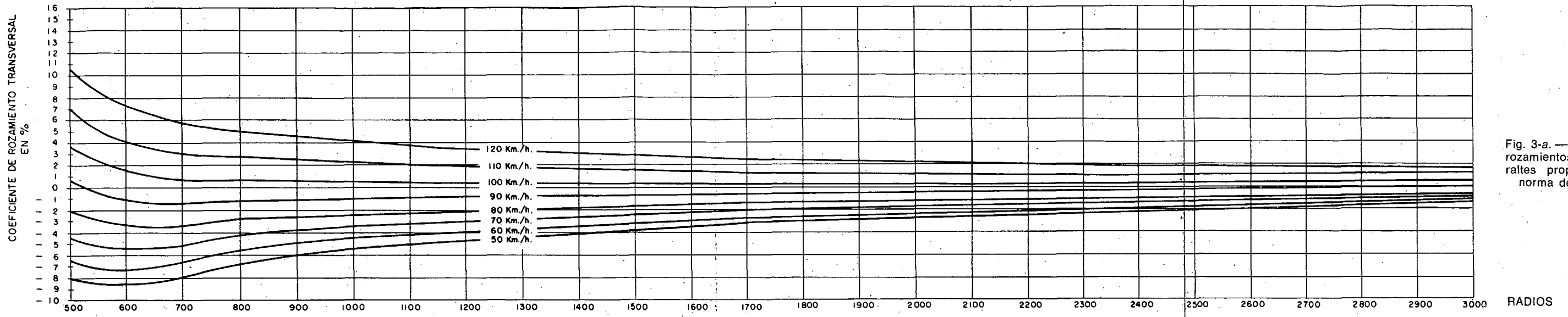


Fig. 3-a. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos por la norma de los EE. UU.

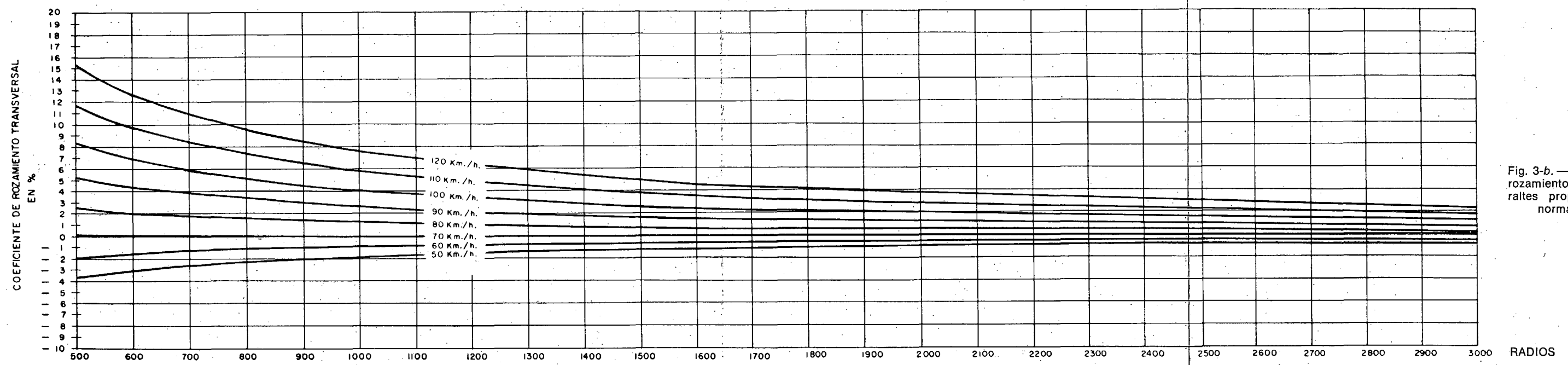


Fig. 3-b. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos por la norma alemana.

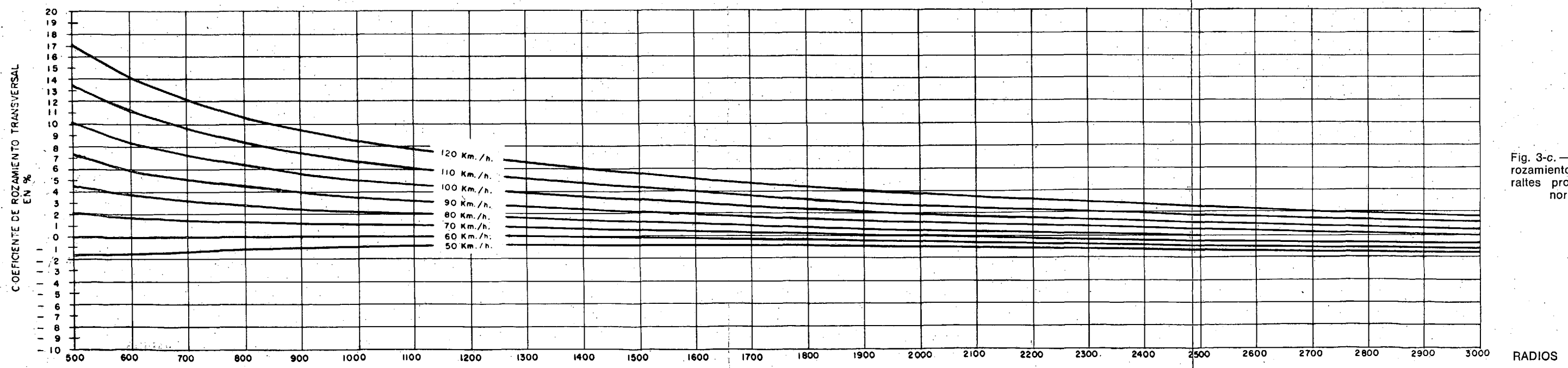


Fig. 3-c. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos por la norma suiza.

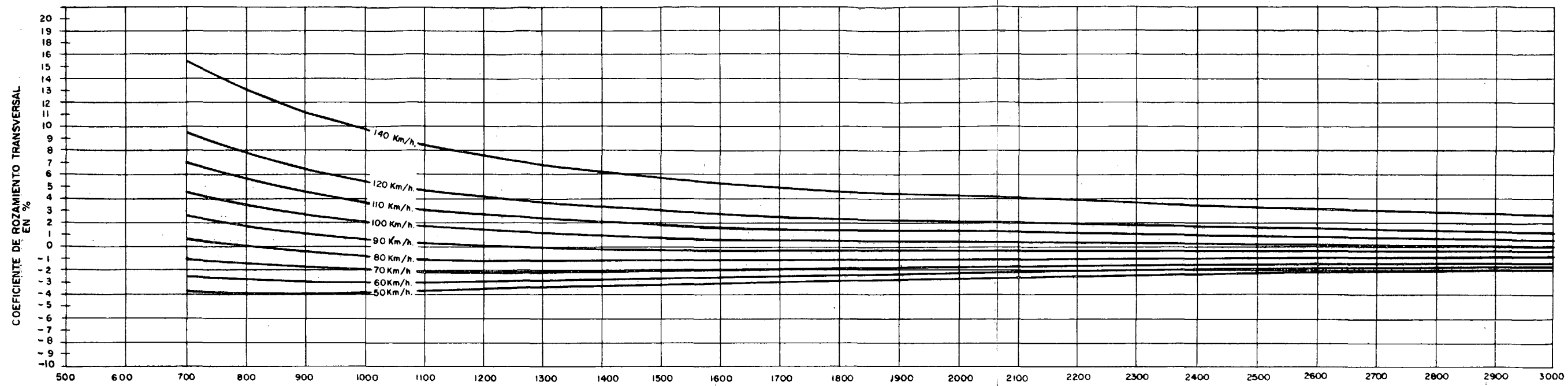


Fig. 3-d. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos por la norma francesa.

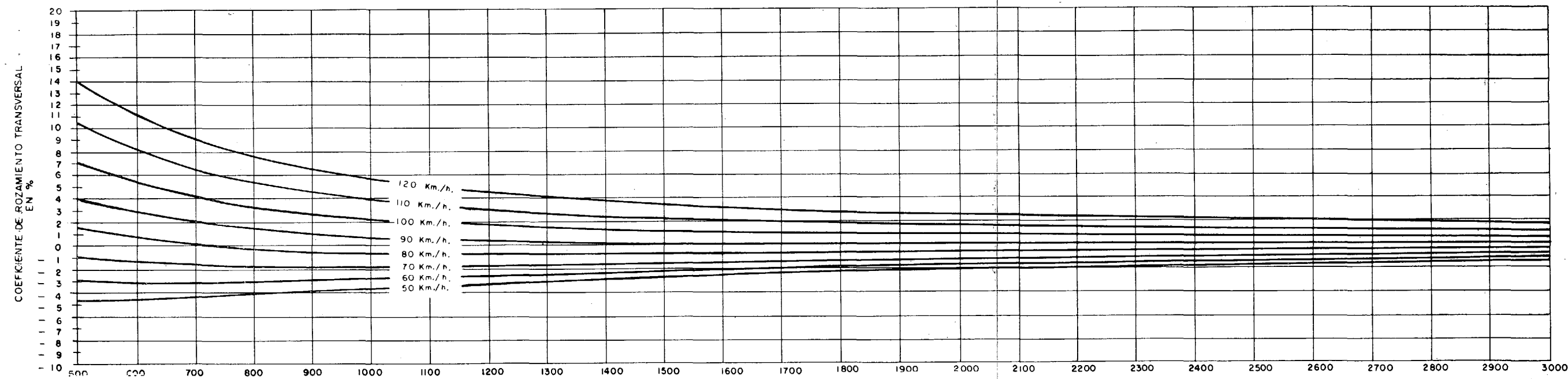


Fig. 3-e. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos por la norma de D. José Puy Huarte.

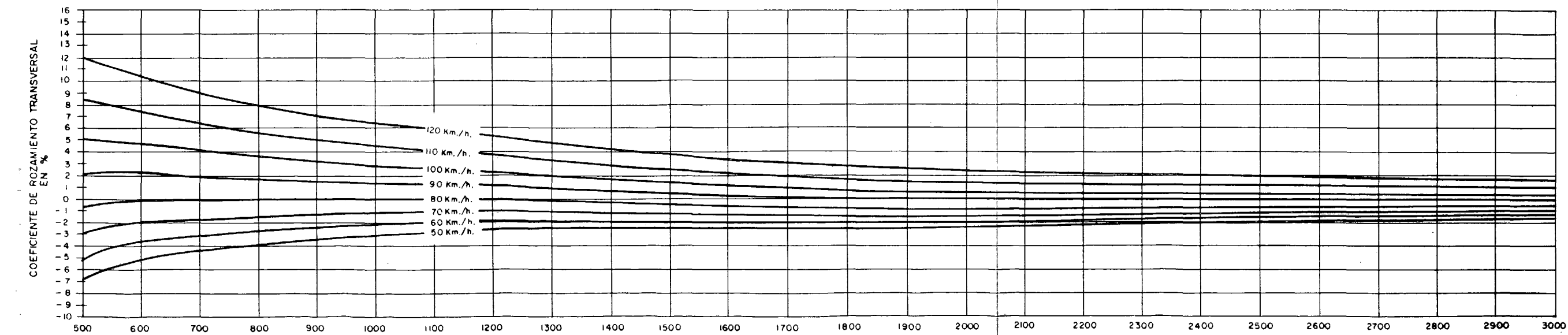


Fig. 3-f. — Distribución de rozamientos según los peraltes propuestos.

Este radio podemos considerarlo como mínimo absoluto; el coeficiente de rozamiento que corresponde a la velocidad media de 80 Km./h.

$$f = \frac{80^2}{127 \times 475} - 0,12 = -0,015$$

Por tanto, el criterio que seguiremos en este caso será poner $P = \frac{120^2}{127 R} - 0,12$ hasta un valor de R tal que:

$$\frac{120^2}{127 R} - 0,12 = \frac{80^2}{127 R} \quad \text{luego} \quad R = \frac{120^2 - 80^2}{127 \times 0,12} = 525 \text{ m.}$$

1.4. Método para la aplicación de peraltes y radio mínimo recomendable.

La figura 1-b nos indica un método racional para dimensionamiento de peraltes en curvas y es simplemente dimensionar los peraltes para que los vehículos que van a 80 Km./h. tomen la curva con plena facilidad, ya que ésta es la velocidad media, y no solamente la media, sino la más frecuente; siendo así el peralte P que corresponde a una curva de radio R será $P = \frac{80^2}{127 R}$; a esto se le puede poner la

objeción de que un vehículo, marchando a 120 Km./h., marcha en peores condiciones que uno marchando a 40 Km./h.; pero también hay que observar la forma disimétrica de la curva, ya que, con velocidad inferior a 75 Km./h., hay un 46 por 100 de los vehículos, y con velocidad superior a 80 Km./h. hay un 36 por 100; es por esto por lo que parece razonable adoptar este criterio. Si dimensionamos los peraltes con este criterio, hay que observar que los coeficientes de rozamiento necesarios disminuyen con el radio; si suponemos que con un coeficiente de rozamiento de 0,05 el confort es suficiente obtenemos de esta manera el radio mínimo recomendable mediante la ecuación:

$$\frac{120^2 - 80^2}{127 R} = 0,05, \quad R = \frac{120^2 - 80^2}{6,35} = \frac{8000}{6,35} = 1260 \text{ m.}$$

luego podemos fijar el radio mínimo recomendable en 1 250 m.

1.5. Caso en que el peralte máximo no es 0,12.

En el caso de que el peralte máximo sea, por ejemplo, 0,06, caso de hielo y nieve, el radio mínimo admitido vendrá dado por la fórmula:

$$R = \frac{120^2}{127 \times 0,18} = 630 \text{ m.}$$

Para este radio, el coeficiente de rozamiento necesario para circular a 80 kilómetros/hora será:

$$f = \frac{80^2}{127 \times 630} - 0,06 = 0,02.$$

El radio para el cual $f = 0$ se deduce de la ecuación:

$$\frac{80^2}{127 R} = 0,06; \quad R = 840 \text{ m.}$$

El criterio a seguir, y en esto se difiere ligeramente del criterio de la A. A. S. H. O., es conservar el peralte máximo hasta el radio $R = 840 \text{ m.}$, y a partir de aquí dimensionar los peraltes para $V = 80 \text{ Km./h.}$

1.6. Dimensionado de peraltes.

Hallemos primeramente el valor de R , para el cual el coeficiente de rozamiento a una velocidad de 50 Km./h. sea $0,025$, que es una cantidad pequeña, la ecuación será:

$$\frac{80^2 - 50^2}{127 R} = 0,025; \quad R = 1228 \text{ m.}$$

Para este valor, el coeficiente de rozamiento necesario a 120 Km./h. será $\frac{120^2 - 80^2}{127 \times 1228} = 0,05$; esto sugiere que, siendo los coeficientes de rozamiento en todas las velocidades pequeñas prácticamente despreciables, se conserva $f = 0,025$ para $V = 50 \text{ Km./h.}$, hasta un radio tal que $f = 0,025$ para $V = 120 \text{ Km./h.}$, la fórmula de los peraltes será entonces $P = 0,025 + \frac{50^2}{127 R}$, y esta fórmula será válida hasta un valor de R tal que para $V = 120 \text{ Km./h.}$, $f = 0,025$, y se tendrá $127 R (P + 0,025) = 120^2$, luego tenemos las dos ecuaciones:

$$P - 0,025 = \frac{50^2}{127 R}$$

$$P + 0,025 = \frac{120^2}{127 R}$$

De aquí se deduce $R = 1900$, $P = 3,6$ por 100.

La velocidad a la que se circula más cómodamente con estas características es: $V^2 = 127 \times 1900 \times 0,036$; $V = 92 \text{ Km./h.}$

Podemos dimensionar para $V = 92 \text{ Km./h.}$ a partir de un radio de 1900 .

Resumiendo las fórmulas que se proponen son:

Tomar el menor de los valores.

$$P = P_{\text{máx}} \quad \text{ó} \quad P = \frac{120^2}{127 R} - 0,12 \quad \text{desde} \quad R = R_{\text{mín}} \quad \text{hasta} \quad R = \frac{80^2}{127 P_{\text{máx}}} \quad \text{ó} \quad R_1 = 525 \text{ m.}$$

Y para radios mayores de R_1 :

$$P = \frac{80^2}{127 R} \quad \text{desde} \quad R = R_1 \quad \text{hasta} \quad R = 1228$$

$$P = \frac{92^2}{127 R} + 0,025 \quad \text{desde} \quad R = 1228 \quad \text{hasta} \quad R = 1900$$

$$P = \frac{92^2}{127 R} \quad \text{para} \quad R > 1900$$

En las figuras 3-a, 3-b, etc., se expresa la distribución de rozamientos según las normas vigentes en la A. A. S. H. O., Alemania, Suiza, Francia, las dadas por José Puy Huarte en su conferencia y las que se proponen.

1.7. Formas de transición de peraltes.

En caso de autopista curva, que es un caso muy general a poco accidentado que sea el terreno la forma lógica, es partir de sección transversal horizontal en el punto de inflexión de la clotoide y ganar el peralte uniformemente a lo largo de la clotoide; si procedemos de esta manera hemos de partir de la base de que el punto de inflexión de la clotoide no ha de coincidir ni con un punto alto ni con un punto bajo, ya que esto imposibilitaría la adecuada evacuación de las aguas superficiales; es ésta una de las razones por las que se ha de procurar que los puntos de inflexión en planta no coincidan con curvas verticales en perfil. Aun considerando que se ha conseguido una coordinación planta-perfil longitudinal adecuada se pueden presentar igualmente problemas de drenaje; en efecto, para un radio $R = 3\,000$ metros, el peralte que le corresponde es $P = 2,27$ por 100; como la clotoide correspondiente a este círculo puede tener un parámetro $A = 1\,000$; la longitud de transición es $L = 333$ m.; luego entonces nos encontramos con que disponemos de 333 metros, con una pendiente menor de 2,27 por 100, lo cual dificulta notablemente la evacuación de las aguas superficiales; este problema ya ha sido resuelto en la primera parte del trabajo, en el cual fijábamos la condición de que la longitud de la transición, hasta alcanzar el 2 por 100, sea de 50 m.

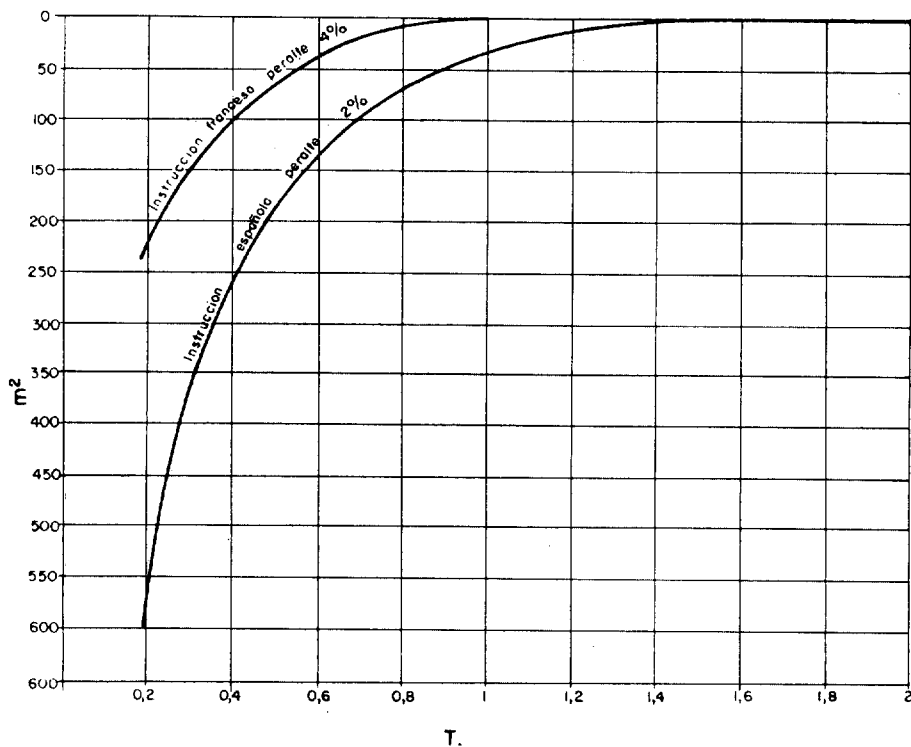
1.8. Resumen.

Puede ser interesante resumir el criterio seguido para el dimensionado de peraltes:

- 1.º Fijación de un peralte máximo.
- 2.º Análisis de distribución de velocidades.
- 3.º Fijación de la velocidad óptima para la que se proyectan los peraltes con objeto de ponerlo, lo más rápidamente posible, a la mayor parte de los vehículos con coeficiente de rozamiento inferiores a 0,025 (en nuestro caso, para $R = 1\,228$ m., quedan el 6 por 100 con rozamientos superiores).
- 4.º A partir de $R = 1\,228$ m. llevar lo más rápidamente posible a los vehículos que circulan a velocidades altas a disfrutar también de un $f = 0,025$ (esto se consigue para $R = 1\,900$ m. según hemos apuntado).
- 5.º Una vez que están todos los vehículos metidos en unos rozamientos de $\pm 0,025$ favorecer las altas velocidades proyectándose para $V = 92$ Km./h.

Se expone en el cuadro 1 los peraltes según las normas de la A. A. S. H. O. los dados en la conferencia de José Puy Huarte y los propuestos en esta ocasión se hace observar que los propuestos coinciden bastante bien con los de José Puy Huarte en radios grandes, y con los de la A. A. S. H. O. en radios pequeños.

Lo único que se quiere dar aquí es un posible sistema para hacer el estudio de peraltes, ya que todo está basado en las figuras 1-a y 1-b, que dependen de muchos factores, como pueden ser pendientes longitudinales o incluso composición del tráfico; lo que sí se puede afirmar es que la forma de la curva es siempre la misma y, por tanto, se puede desplazar.



ABSCISAS= TIEMPOS

ORDENADAS= m² QUEDAN SIN DESAGUAR PARA UN TIEMPO DADO

COMPARACION DE PERALTES ENTRE LA INSTRUCCION ESPAÑOLA Y LA FRANCESA

A = 610

R = 1.400

PENDIENTE LONGITUDINAL 1%

NORMA FRANCESA :

$$S = \frac{7,5^2 \times 266(1 - a^2)^2}{8a \sqrt{133 \times 7,5}}$$

NORMA ESPAÑOLA :

$$S = \frac{7,5^2 \times 266(2 - a^2)^2}{16a \sqrt{133 \times 7,5}}$$

Figura 4.

De cualquier forma, como la tendencia en autopistas es a tener una distribución de velocidades como la de la figura, se proponen como norma los peraltes que se han hallado con este criterio.

La figura 3 indica el coeficiente de rozamiento necesario según la velocidad del vehículo y los perfiles adoptados.

Observaciones.

En la presente propuesta:

Peralte máximo.	12	10	8	6
Radios mínimos absolutos (redondeados).	475	550	600	650

Si en algún caso el peralte correspondiente a un determinado radio es mayor que el peralte máximo admitido se tomará el citado peralte máximo.

Observemos, por último, que en la fórmula que relaciona R_v , R_h y P el radio vertical necesario para conservar en todo momento la visibilidad en perfil disminuye cuando aumenta el peralte y, por consiguiente puede haber casos en que el aumento de dicho peralte, en un 1 por 100 nos permite disminuir el radio vertical necesario. (Ver cuadro de la página siguiente.)

2. JUSTIFICACION DE LA SECCION TRANSVERSAL

El trazado no solamente tiene importancia en lo que se refiere a la planta y perfil longitudinal, sino también en lo relativo a la sección transversal desde el punto de vista geométrico. Por ello, la sección transversal adoptada, aunque en muchos aspectos es completamente normal, en otros merece un comentario e incluso una justificación.

Al referirnos aquí a la sección transversal vamos a dejar a un lado los peraltes y sus transiciones ya justificados debidamente en el anterior capítulo y vamos a ceñirnos a la sección transversal básica; es decir, primordialmente a los anchos adoptados para los diversos elementos que intervienen en la sección.

El asunto de las calzadas es completamente normal, se adoptan vías de 3,75 m., lo que da un ancho total por calzada de 7,50 m.

El arcén derecho de cada calzada tiene una dimensión de 3,00 m., y ello por varias razones:

En primer lugar, por una cuestión de seguridad y posible estacionamiento de vehículos en determinados momentos.

En segundo lugar, porque es conveniente que el cimientto de la carretera quede algo alejado de los laterales por aislar lo más posible dicho cimientto de las migraciones de humedad procedentes de dichos laterales.

En tercer lugar, por la duración del firme.

En el ensayo A. A. S. H. O. se comprobó que la duración del firme en la rodada exterior era sensiblemente menor que en la rodada interior, y esto parece haber sido por dos motivos. El primero, el que mencionamos antes de los cambios de hu-

CUADRO 1.

R A D I O S	P E R A L T E S %					
	J. P. Huarte	Propuestas Peralte máximo 12 %	A. A. S. H. O.			
			P E R A L T E S M A X I M O S			
			12 %	10 %	8 %	6 %
430			12,00			
500	8,59	10,70	12,00	10,00	8,00	
550	8,20	9,16				
600	7,84	8,40	11,70	10,00	8,00	6,00
650	7,51	7,75				
700	7,20	7,20	10,50	9,40	7,80	6,00
750	6,92	6,72				
800	6,65	6,30				
850	6,40	5,93	8,70	8,20	7,20	5,70
900	6,17	5,60				
950	5,95	5,30				
1 000	5,74	5,04				
1 050	5,54	4,80				
1 100	5,35	4,58				
1 150	5,17	4,38	6,50	6,50	6,00	5,00
1 200	5,01	4,20				
1 250	4,85	4,07				
1 300	4,70	4,02				
1 350	4,55	3,96				
1 400	4,42	3,91				
1 450	4,29	3,86				
1 500	4,16	3,81				
1 550	4,053	3,37				
1 600	3,94	3,37				
1 650	3,83	3,69				
1 700	3,73	3,66	4,30	4,40	4,30	3,70
1 750	3,63	3,63				
1 800	3,54	3,59				
1 850	3,45	3,56				
1 900	3,37	3,51				
1 950	3,28	3,42				
2 000	3,21	3,33				
2 050	3,13	3,25				
2 100	3,06	3,17				
2 150	2,99	3,10				
2 200	2,93	3,03				
2 250	2,87	2,96				
2 300	2,81	2,90	3,30	3,30	3,20	3,00
2 350	2,75	2,84				
2 400	2,69	2,78				
2 450	2,64	2,72				
2 500	2,59	2,67				
2 550	2,54	2,61				
2 600	2,49	2,56				
2 650	2,44	2,52				
2 700	2,40	2,47				
2 750	2,36	2,42				
2 800	2,31	2,38				
2 850	2,27	2,34				
2 900	2,23	2,30				
2 950	2,20	2,26				
3 000	2,16	2,22				
3 050	2,13	2,19				
3 100	2,09	2,15				
3 150	2,06	2,12				
3 200	2,03	2,08				
3 250	2,00	2,05				
3 300	1,97	2,02				
3 350	1,94	1,99				
3 400	1,91	1,96	2,20	2,20	2,20	2,10

medad en el cimiento, y el segundo, y quizá más importante, por la falta de contención lateral. Por estas razones parece adecuada esta previsión.

Otro tema es el del arcén interior, aunque quizá sea mejor estudiar esto en conjunción con el ancho de la mediana. Llamaremos en esta ocasión ancho de mediana a la distancia que hay entre los bordes interiores de las dos calzadas.

Es interesante reseñar que en lo que se refiere a medianas deprimidas, estudios efectuados por la Universidad de Yale, han llegado a la conclusión de que medianas de 50 pies (15 m.) son las óptimas para la seguridad. El mínimo ancho deseable para medianas deprimidas es de 9 m. En estudios realizados en esta Oficina, aumentar la anchura de mediana de 5 a 9 m. representaba un aumento en el presupuesto de un 2,2 por 100.

Quando se habla de esta cuestión, no hay más remedio que referirse al tema II de la VII Semana Internacional de Estudio de la Técnica de Circulación por Carretera.

Ives, de Estados Unidos, comenta que el crecimiento prodigioso de la circulación automovil ha costado a su país un millón trescientas mil vidas; tres a cuatro millones de víctimas, inválidas de más o menos gravedad, y en cuanto a gastos materiales se evalúan en noventa mil millones de dólares. Señala que la construcción de medianas ha mejorado notablemente la seguridad, ya que los accidentes más graves son los que se producen por franqueamiento de una calzada a otra. En los últimos diez años ha pasado la anchura de la mediana de 7-10 m. a una media de 13 metros.

A propósito de estas anchuras, Fred Hurd, Director de la Circulación por carretera de la Universidad de Yale, ha recogido, en un informe, que el 60 por 100 de las colisiones frontales por franqueamiento de la mediana central producen heridos o muertos. Si el número de este tipo de accidentes no representa más que el 4 por 100 del total, agrupa el 20 por 100 de los casos mortales.

El mismo Fred Hurd ha mostrado en un gráfico que la variación del porcentaje de las colisiones debidas al franqueamiento de una mediana en función de la anchura de la mediana estaba representada por una línea recta hasta llegar a 10 m., variando del 84 por 100 para una mediana de 0,60 m., al 22 por 100 para una mediana de 10 m. Por encima de 10 m. es otra recta más tendida, de tal forma que cae a un 10 por 100 en 15 m. Tenemos así que cada metro que se gane de anchura, antes de llegar a los 10 m., produce una disminución de colisiones del 6,8 por 100; mientras que cada metro que se gana a partir de 10 m. de anchura lleva consigo una disminución del 2,4 por 100 en las colisiones. Parece, pues, lógico que, conjugando seguridad y economía, fijásemos una anchura de 10 m. (*).

Hay que citar también a Moore y Jehu, del Road Research Laboratory, que recalcan el interés de medianas anchas para evitar el paso a la otra calzada. Este tipo de accidentes lo consideran prácticamente anulado para anchuras de mediana de 15 m. Insisten estos autores en que la depresión de la mediana, si es que se pone, ha de ser ligerísima. Puntualizan que medianas estrechas con barrera de seguridad disminuyen el número de accidentes mortales debidos al franqueamiento de la mediana, pero aumentan el número total de accidentes.

(*) Estas notas han sido redactadas hace dos años. Según nuestras noticias, esta anchura de mediana es el mínimo que va a ser aceptado por la Dirección General de Carreteras.

Pellegrini afirma que las medianas deben oscilar entre 15 y 30 m. de ancho, aunque lo que parece que le preocupa más al autor, es el asunto del deslumbramiento. Como decimos en otra parte, este asunto será resuelto, en parte, con la solución de autopista curva.

En el resumen Ricker, Ingeniero de Circulación de Pensilvania, concluye que la mejor manera de eliminar los accidentes relativos al franqueamiento de la mediana es ampliar ésta. Señala que la anchura mínima de mediana en la red estatal interamericana es de 11 m. Opina que la instalación de barreras crea nuevos accidentes, si bien los accidentes son menos graves.

Mencionaremos también los estudios de Hutchinson y Kennedy de la Universidad de Illinois que llegan a la conclusión de que, siempre que se consideren medianas suavemente deprimidas, la anchura mínima que se puede considerar segura es de 9 m. (*) Una vez comentadas todas estas opiniones, nuestro dilema estaba entre medianas estrechas con barreras de seguridad o medianas anchas sin barreras.

Como antes dijimos, se hizo la comparación entre mediana de cinco y nueve metros y la diferencia de coste por kilómetro fue de 1 200 000 pesetas, incluido movimiento de tierras, expropiación y ampliación de obras de fábrica; la mitad de esto cuesta una barrera de seguridad que no resuelve totalmente el problema.

Hay que tener en cuenta, además, que en terrenos menos accidentados que el nuestro el coste adicional por cada metro de anchura que se aumente en la plataforma es menor y el de la barrera de seguridad es el mismo, con lo cual es todavía más favorable la consideración de medianas anchas.

Veamos ahora de estos nueve metros lo que corresponde a arcén y lo que corresponde a mediana deprimida propiamente dicha (**). Haciendo un razonamiento análogo a los que hicimos para el arcén exterior, y teniendo en cuenta, a su vez, razones de economía, fijamos el arcén en 1,50 m., con lo cual la rodada exterior se pone a una distancia de 2,50 m. del borde exterior; además aquí no es tan grave el fenómeno, puesto que es de esperar que el tráfico pesado vaya principalmente por el carril derecho.

3. CONSIDERACIONES FINALES

Refiriéndonos al estudio sobre peraltes, se ha de decir que lo que se ha pretendido es plantear el análisis de un modo lo más racional posible, de modo que si la distribución de velocidades no es la del estudio, no serán tampoco los peraltes obtenidos los adecuados. Sin embargo, la distribución de velocidades adoptada no parece que difiera mucho de la que se puede esperar.

Párrafo aparte merece la adopción de peraltes máximos admisibles. Sería un error lamentable fijar un peralte máximo admisible para todo el país, ya que hay

(*) Medians of Divided Highways — Frequency and nature of vehicle encroachments by John W. Hutchinson. Thomas W. Kennedy University of Illinois, College of Engineering. Engineering Experiment-Station, Bulletin 487.

(**) Ancho mínimo aceptable. Recordemos que estas notas y estudios se han realizado para un proyecto específico, de ahí la referencia a medidas concretas. De todos modos, los criterios y razonamientos son de tipo general.

condiciones climatológicas distintas en las diferentes regiones; podemos considerar, por ejemplo, las zonas Norte, Centro y Sur, que están claramente diferenciadas en cuanto a la adopción de peraltes máximos admisibles.

Por último, nos referimos a la fórmula de visibilidad en perfil, esta fórmula implica una limitación más el trazado de nuestra autopista, y, como toda limitación, cuesta dinero; entonces el proyectista debe analizar en cada caso cuánto cuesta el cumplir la condición y en cada caso decidir si merece la pena, si en algún caso no le conviene más analizar lo que pasaría aumentando ligeramente el peralte o resignarse a perder la visibilidad, admitiendo eventualmente una pérdida de trazado.

La experiencia que tenemos en esta Oficina es que la limitación antes mencionada no suele ser costosa, a condición de que se haya analizado el trazado de manera profunda mediante el estudio de muchas soluciones. Es aquí, en el estudio de soluciones, donde está la verdadera economía de la obra; en efecto, una vez decidido el trazado más adecuado técnica y económicamente, ya está fijado el coste de la obra, pues queda definido el volumen de movimiento de tierras, longitud de grandes obras de fábrica, pequeñas obras de fábrica, expropiaciones, etc. A partir de esto, las posibilidades de economizar son muy limitadas; quizá un acierto en un puente suponga una ligera economía, pero la realidad es que el coste de la obra prácticamente queda fijado. Se podría argüir que muchas veces la limitación de plazo para la realización de los proyectos se opone a un tanteo exhaustivo de soluciones, sobre todo teniendo en cuenta que mientras no esté terminado el trazado no se puede emprender el desarrollo de múltiples facetas del proyecto. Realmente esto es así; sin embargo, en términos técnicos naturalmente, no me he podido explicar nunca cómo en países cuyas posibilidades de inversión en carreteras son bastante limitadas hay tanta prisa por acabar los proyectos, tanto más, cuanto que hay muchos proyectos que no pasan de eso, de proyectos; sería más conveniente adelantar el comienzo del proyecto y acortar los trámites de tipo administrativos que acortar el plazo de redacción, lo que con toda seguridad es antieconómico. Quizá la solución de este problema fuese que la redacción del proyecto se contemplase como una primera fase auténtica de la realización de la obra, como hoy puede ser el despeje y desbroce, y, por consiguiente, de ninguna manera fuese detenida su ejecución inmediata. Para decidir si la obra hay que hacerla o no y cuándo, ya están los estudios previos; se conseguiría así que no se proyectase en balde, que todos los proyectos se realizasen antes de que el enorme avance tecnológico los hiciese inservibles y que, planeados con suficiente antelación, fuesen, dentro de la capacidad del proyectista, perfectos.

NOTA SOBRE CURVAS EN S

Curvas en S que enlazan dos curvas de radio R_1 y R_2 .

Supongamos dos círculos de radios R_1 y R_2 unidos por una curva en S de parámetros A_1 y A_2 , de tal forma que

$$\frac{A_1}{R_1} = \frac{A_2}{R_2}, \text{ es decir } \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2}, \text{ siendo}$$

A = parámetro de las clotoides.

L = longitud entre el punto de radio infinito y el punto de radio R .

En el triángulo rectángulo de la figura 1 tenemos, despreciando cantidades pequeñas:

$$\frac{(L_1 + L_2)^2}{4} + (R_1 + R_2 + AR_1 + AR_2)^2 = \overline{O_1 O_2}^2 = (R_1 + R_2 + D)^2$$

siendo D la distancia entre los dos círculos. Y en el triángulo rectángulo de la figura 2:

$$(R_1 + R_2 + D)^2 = (R_1 + R_2)^2 + T^2$$

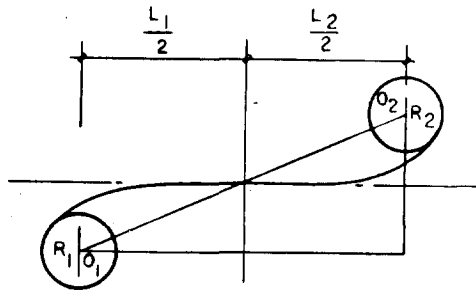


Figura 1.

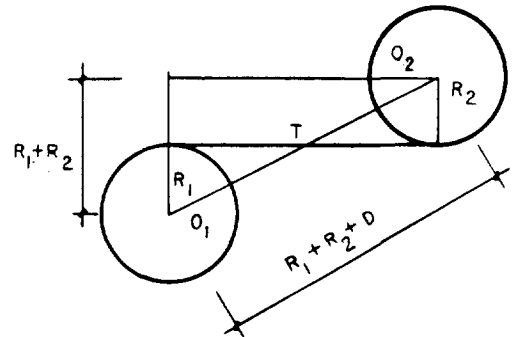


Figura 2.

por consiguiente:

$$\frac{(L_1 + L_2)^2}{4} + (R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2)^2 = (R_1 + R_2)^2 + T^2$$

como

$$\Delta R_1 = \frac{L_1^2}{24 R_1} \quad \Delta R_2 = \frac{L_2^2}{24 R_2}$$

se tiene, despreciando los cuadrados de $\Delta R_1 \cdot \Delta R_2$

$$\frac{(L_1 + L_2)^2}{4} + (R_1 + R_2) \left(\frac{L_1^2}{12 R_1} + \frac{L_2^2}{12 R_2} \right) = T^2$$

$$\frac{(L_1 + L_2)^2}{3} + \frac{R_1 R_2}{12} \left(\frac{L_1}{R_1} - \frac{L_2}{R_2} \right)^2 = T^2$$

si

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2} \quad L_1 + L_2 = \sqrt{3} T$$

* * *

Para justificar la construcción citada en la primera parte de este trabajo, supondremos que la longitud es la misma uniendo por recta y por clotoide, y entonces se tiene

$$L_1 + L_2 = \sqrt{3} T$$

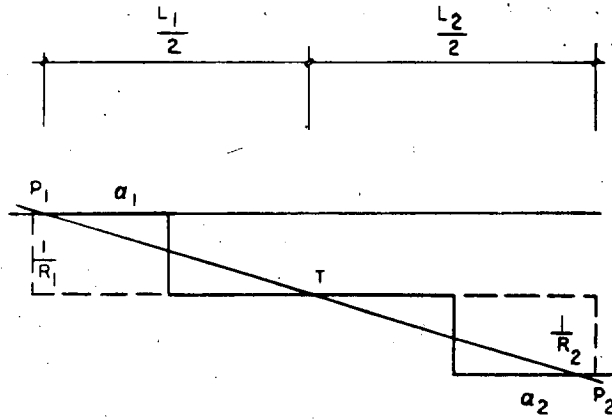


Figura 3.

como los puntos P_1 y P_2 tienen la misma orientación uniéndolos con recta o uniéndolos con clotoide; la diferencia de ángulos de giro ha de ser la misma en los dos casos.

$$\frac{\alpha_2}{R_2} - \frac{\alpha_1}{R_1} = \frac{L_2}{2R_2} - \frac{L_1}{2R_1} = 0; \quad \frac{\alpha_2}{R_2} = \frac{\alpha_1}{R_1}; \quad \alpha_1 + \alpha_2 = (\sqrt{3} - 1)T$$

$$\alpha_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = (\sqrt{3} - 1)T$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1 T (\sqrt{3} - 1)}{R_1 + R_2} \quad \text{si} \quad R_1 = R_2; \quad \alpha = \frac{T(\sqrt{3} - 1)}{2}$$

que es el resultado obtenido anteriormente.

Diagramas de curvaturas.—Según hemos dicho, se llevan en abscisas longitudes y en ordenadas curvaturas; el área encerrada entre dos puntos del diagrama de curvaturas mide el ángulo de giro entre esos dos puntos; significativo es el diagrama de curvaturas de curvas en óvalo en C y en S; en ellos vemos que la curva en C no es muy recomendable.

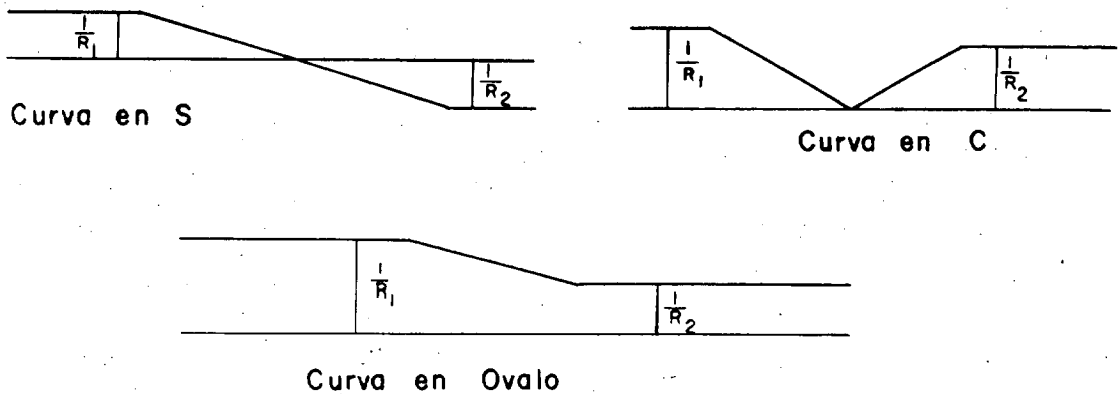


Figura 4.

NOTA SOBRE LA EXPRESION DE VISIBILIDAD EN PERFIL

Según hemos dicho, la expresión de visibilidad en perfil viene dada por:

$$\frac{R_v}{R_H} = \frac{\varphi (\text{sen } \varphi - \varphi/2) / (1 - \cos \varphi)}{\rho + \frac{1,2}{R_H (1 - \cos \varphi)}} = \frac{\varphi \left(\text{sen } \varphi - \frac{\varphi}{2} \right)}{\rho (1 - \cos \varphi) + \frac{1,2}{R_H}}$$

Vemos que el peralte es un elemento de visibilidad más importante incluso que la altura del punto de vista del automovilista. Vamos a suponer que el peralte viene dado por:

$$\rho = \frac{6.400}{127 R_H} = \frac{50}{R_H}$$

que corresponde a una velocidad óptima de 80 Km./h.

Entonces

$$\frac{R_v}{R_H 2} = \frac{\varphi \left(\text{sen } \varphi - \frac{\varphi}{2} \right)}{50 (1 - \cos \varphi) + 1,2}$$

Intentemos hallar el valor de φ que hace esta expresión máxima.

$$\left[\left(\text{sen } \varphi - \frac{\varphi}{2} \right) + \varphi \left(\cos \varphi - \frac{1}{2} \right) \right] [50 (1 - \cos \varphi) + 1,2] - 50 \varphi \text{sen } \varphi \left[\text{sen } \varphi - \frac{\varphi}{2} \right] = 0$$

$$[\text{sen } \varphi - \varphi (1 - \cos \varphi)] [50 (1 - \cos \varphi) + 1,2] - 50 \varphi \text{sen}^2 \varphi + 50 \frac{\varphi^2}{2} \text{sen } \varphi = 0$$

$$50 \text{sen } \varphi (1 - \cos \varphi) + 1,2 \text{sen } \varphi - 50 \varphi (1 - \cos \varphi)^2 - 1,2 \varphi (1 - \cos \varphi) - 50 \varphi \text{sen}^2 \varphi + 50 \frac{\varphi^2}{2} \text{sen } \varphi = 0$$

$$50 \text{sen } \varphi (1 - \cos \varphi) - 50 \varphi [1 - 2 \cos \varphi + 1] + 1,2 [\text{sen } \varphi - \varphi (1 - \cos \varphi)] + 50 \frac{\varphi^2}{2} \text{sen } \varphi = 0$$

$$(1 - \cos \varphi) [-50 \text{sen } \varphi + 100 \varphi + 1,2 \varphi] = \text{sen } \varphi [1,2 + 25 \varphi^2]$$

vemos, pues, que podemos prescindir de la altura del automovilista sin error sensible, y nos queda

$$50 (2 \varphi - \text{sen } \varphi) (1 - \cos \varphi) = 25 \varphi^2 \text{sen } \varphi; \quad 2 (2 \varphi - \text{sen } \varphi) (1 - \cos \varphi) = \varphi^2 \text{sen } \varphi.$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[\frac{\varphi^2 \text{sen } \varphi}{2 (1 - \cos \varphi)} + \text{sen } \varphi \right]$$

Siguiendo un método iterativo $\varphi = \frac{\pi}{6}$; $\text{sen } \varphi = 0,5$; $\cos \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$ y entrando con estos valores $\varphi = \frac{0,512 + 0,5}{2} = 1,012/2 = 0,506$, que es bastante próximo a $\frac{\pi}{6}$, y de aquí es de donde obtuvimos $\varphi = 30^\circ$; es claro que este valor es solamente aproximado, por lo que el máximo habrá que hallarlo en cada caso según los radios y los peraltes adoptados; es decir, que según los peraltes así serán los radios verticales mínimos para no perder visibilidad.

Solamente nos resta la observación de que la expresión anterior nos da el radio vertical necesario para mantener una distancia de visibilidad dada; en efecto, supongamos que pretendemos mantener una distancia de visibilidad en perfil de 400 m. en una curva de radio horizontal de 2 000 m. Suponiendo un peralte de 3,33 por 100, entonces $\varphi = \frac{400}{2\,000} = \frac{1}{5} = 11,5^\circ$; $\text{sen } \varphi = 0,20$; $\text{cos } \varphi = 0,98$.

$$R_v = \frac{400 \left[\text{sen } \frac{1}{5} - \frac{1}{10} \right]}{0,033 \left(1 - \text{cos } \frac{1}{5} \right) + \frac{1,2}{2\,000}} = \frac{40}{0,001266} = 31\,600 \text{ m.}$$

Si quiero mantener esta visibilidad con una curva de radio $R = 1\,000$ metros:

$$P = 5,04\% ; \quad \varphi = \frac{2}{5} = 22^\circ ; \quad \text{sen } \varphi = 0,39 ; \quad \text{cos } \varphi = 0,92$$

$$R_v = \frac{400 (0,39 - 0,20)}{0,0504 \left(0,08 + \frac{1,2}{1\,000} \right)} = \frac{76}{0,005232} = 14\,500 \text{ m.}$$