

EL TRAZADO EN PLANTA EN LA NUEVA INSTRUCCION 3.1-IC (1990)

I. Alineaciones circulares

ANGEL APARICIO (*)

RESUMEN. Recientemente la Dirección General de Carreteras del MOPT ha culminado la revisión de la Instrucción 3.1-IC de Trazado de Carreteras con la publicación de un borrador. Esta revisión ha coincidido con la emprendida en otros países a partir de 1980. En el artículo se analizan las disposiciones referentes a las alineaciones circulares, comparando las propuestas de los documentos de los diferentes países.

ABSTRACT. The Roads Administration of the Ministry of Public Works and Transport has just completed its review of Prescription 3.1-IC of Road Layout and has published a draft. This review is similar to those initiated by other countries from 1980. The article analyzes the provisions which refer to curves, comparing proposals from the different national documents.

1. INTRODUCCION

La normativa sobre trazado de carreteras empleada por la Dirección General de Carreteras del MOPT en los últimos años ha consistido en dos documentos principales: la Instrucción 3.1-IC «Características geométricas. Trazado», aprobada por Orden Ministerial de 23 de abril de 1964, y la Instrucción 3.1-IC «Instrucción de Carreteras. Norma complementaria de la 3.1-IC. Trazado de autopistas», aprobada por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1976.

A partir de 1980, numerosos países han comenzado un proceso de revisión de sus recomendaciones en esta materia, modificando en ocasiones de forma importante determinados aspectos de las normas. De esta manera, el «Department of Transport» del Reino Unido ha elaborado la «Departmental Standard TD 9/81»; en Alemania, la FGSV (1) ha publicado en 1984 la «RAS-L-1» (2); la AASHTO (3), por su parte, ha elaborado en 1984 el documento «A Policy on Geometric Design of Highways and Streets», revisada en 1990.

La Dirección General de Carreteras del MOPT no ha sido ajena a esta corriente. Desde 1985 se ha venido trabajando en la reforma de la normativa de trazado,

intentando dar en ella mayor importancia a las consideraciones de seguridad del usuario. En 1990 se finalizó el borrador definitivo de la nueva Instrucción 3.1-IC/1990, borrador cuya tramitación se encuentra en curso.

Este borrador aborda tanto el trazado de autopistas y autovías como el de carreteras convencionales, en medio urbano y fuera de poblado, modificando de manera importante la normativa anterior, particularmente en lo que se refiere al trazado en planta.

El propósito de este trabajo es el de presentar las novedades que la nueva Instrucción presenta en cuanto al trazado en planta. En este primer artículo analizaremos los aspectos referentes a las alineaciones circulares.

2. CONSIDERACIONES TEORICAS

2.1. EL MOVIMIENTO DEL VEHICULO EN UNA CURVA CIRCULAR

Cuando un vehículo circula por una curva de radio R y peralte p (figura 1), se ve sometido a una fuerza centrífuga que es compensada por la componente del peso del vehículo paralela a la superficie de la carretera y por la fuerza de rozamiento entre los neumáticos y el pavimento. Esta última será igual a un coeficiente de rozamiento transversal (f) multiplicado por la reacción normal a la zona de contacto neumático-firme. Tendremos, por consiguiente:

$$m \frac{v^2}{R} = P \sin(p) + f P \cos(p)$$

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX.

(1) Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrsweesen.

(2) Richtlinien für die Anlage von Strassen. Linienführung. Abschnitt 1. Elemente der Linienführung.

(3) American Association of State Highway and Transportation Officials.

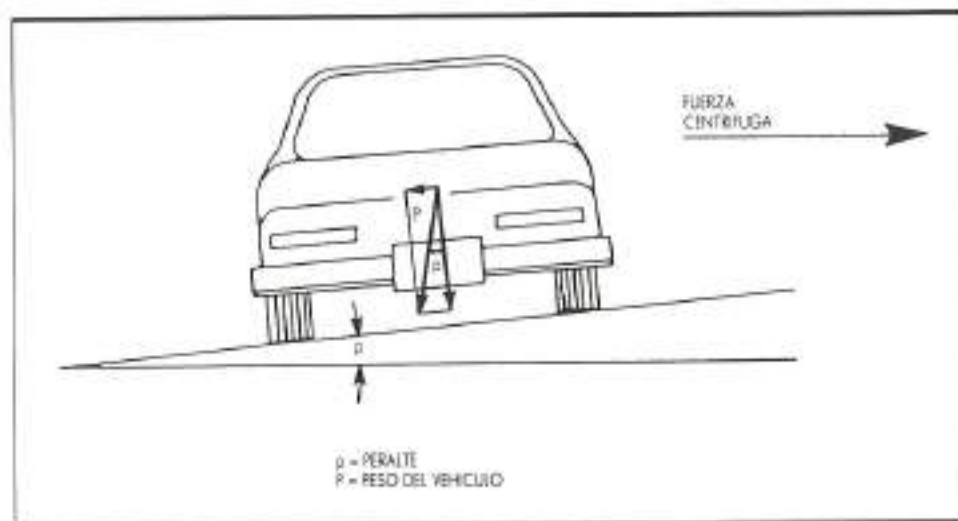


FIGURA 1.

$$\begin{aligned} \frac{P}{g} \frac{v^2}{R} &= P \sin(p) + f P \cos(p) \\ \frac{v^2}{gR} &= \sin(p) + f \cos(p) \end{aligned} \quad [1]$$

Al ser, en general, los valores del peralte pequeños, podemos considerar $\sin(p) = p$ y $\cos(p) = 1$. La ecuación [1], por consiguiente, queda:

$$\frac{v^2}{gR} = p + f$$

Si expresamos v en km/h y tomamos $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, obtenemos la expresión [2], habitualmente empleada en las diferentes instrucciones de trazado:

$$\frac{v^2}{127 R} = p + f \quad [2]$$

Si suponemos un vehículo circulando a una velocidad v por una curva de peralte p y radio R , el rozamiento transversal movilizado vendrá dado por la ecuación [2], que debe cumplirse siempre. El valor del coeficiente de rozamiento transversal está ligado a ciertas percepciones asociadas a la conducción; por ello, se suele establecer un valor máximo de dicho coeficiente (4). Por consiguiente, dada una curva con su radio y peralte, se puede establecer la velocidad compatible con un valor determinado del coeficiente f , dada por dicha expresión [2]. Al valor que corresponde a un valor máximo del coeficiente f relacionado con la comodidad de la conducción se le denomina **velocidad específica**. Esta velocidad se define, por lo tanto, como la máxima velocidad de recorrido compatible con que el valor de ciertos parámetros de la

conducción (5) y con las percepciones a ella asociados no rebase ciertos límites de comodidad.

En el proyecto de un tramo de carretera suele establecerse una velocidad de referencia, encaminada a obtener un trazado coordinado con la lectura subliminal que el conductor hace de la carretera y su entorno. Suele denominarse a este valor **velocidad de proyecto**. El diseño de las alineaciones circulares debe realizarse considerando dicha velocidad (6).

Las normas de trazado deben, por consiguiente, proponer al proyectista unos ciertos valores de las características geométricas de las alineaciones circulares —radio y peralte— adecuadas para la velocidad de proyecto elegida. El apartado 2.3 indica distintos métodos para establecer una adecuada distribución de radios y peraltes. Antes de abordar ese problema vamos a exponer brevemente las principales características del otro parámetro presente en la ecuación [2]: el coeficiente de rozamiento transversal.

2.2. DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL

De acuerdo con la expresión [2], para un vehículo que circula por una recta de radio R y peralte p con velocidad v , el coeficiente de rozamiento transversal vendrá dado por la fórmula:

$$f = \frac{v^2}{127 R} - p$$

Este coeficiente tendrá un límite superior ($f_{\text{máx}}$), correspondiente al valor en el que las ruedas del vehículo comienzan a deslizar en el pavimento. Lógicamente, en

(4) Suele admitirse que, con valores de f superiores a 0,25, el conductor puede comenzar a tener problemas de seguridad.

(5) Fundamentalmente, el valor del coeficiente de rozamiento transversal, f .

(6) En el presente artículo hablaremos en general de velocidad específica, sabiendo que existe esta relación con la de proyecto.

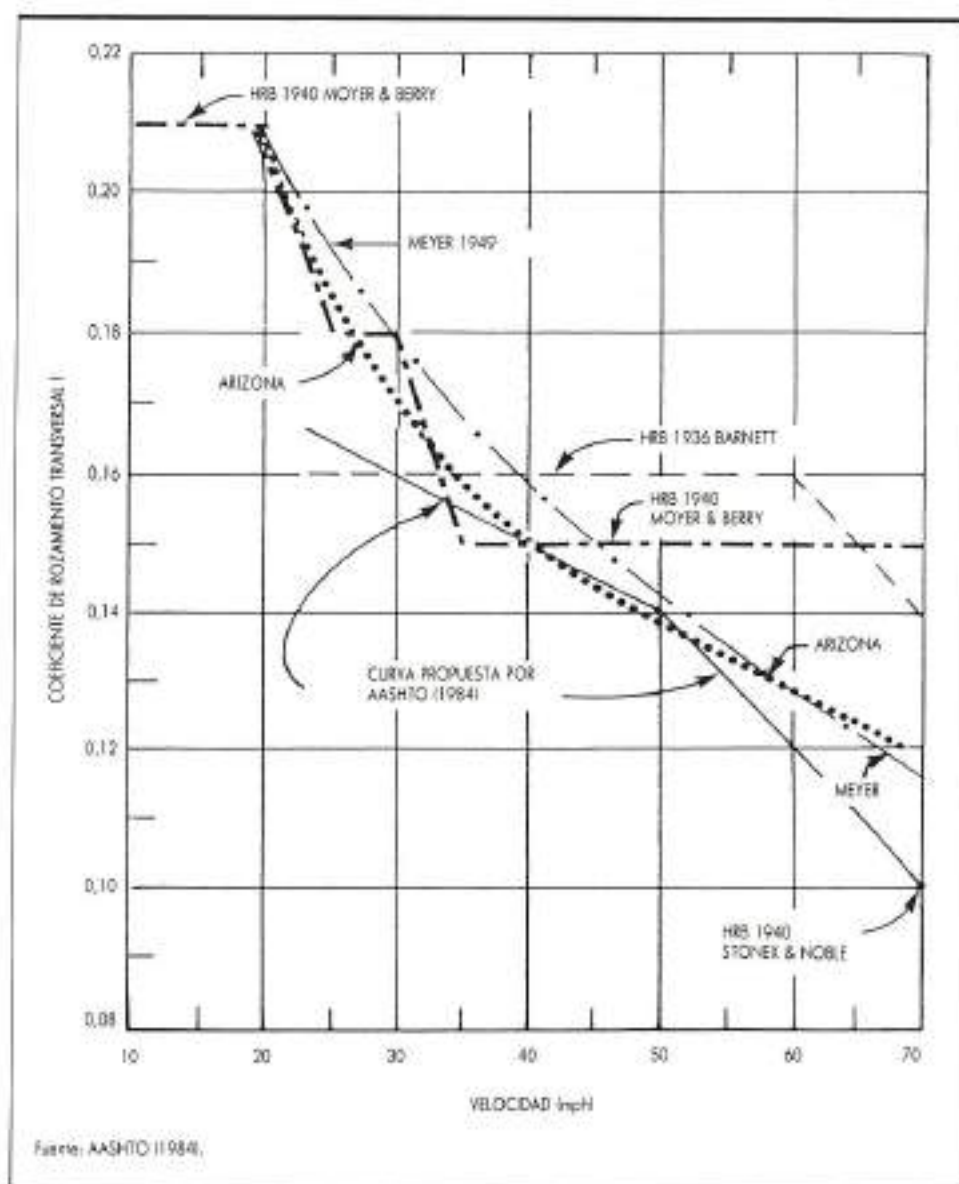


FIGURA 2. Valor del coeficiente de rozamiento transversal en función de la velocidad.

el diseño de carretera esta circunstancia deberá impedirse con un cierto margen de seguridad.

Los valores máximos de este coeficiente han sido medidos por diferentes investigadores. Obviamente, los valores medidos dependen de circunstancias tales como tipo y estado de los neumáticos, características del pavimento, condiciones climáticas, etc. En todos los casos, sin embargo, se ha observado que el valor del coeficiente de rozamiento transversal disminuye al aumentar la velocidad del vehículo.

En el proyecto de una carretera, el valor máximo de este coeficiente a emplear deberá ser sólo un cierto porcentaje del valor máximo disponible. Los valores propuestos, relacionados con una conducción cómoda, deben ser conservadores cuando se trata de pavimentos

secos, y proporcionar un cierto coeficiente de seguridad para pavimentos húmedos o con hielo o nieve. La figura 2 recoge las curvas propuestas por diferentes investigadores, junto con la curva empleada por las recomendaciones de AASHTO (1984).

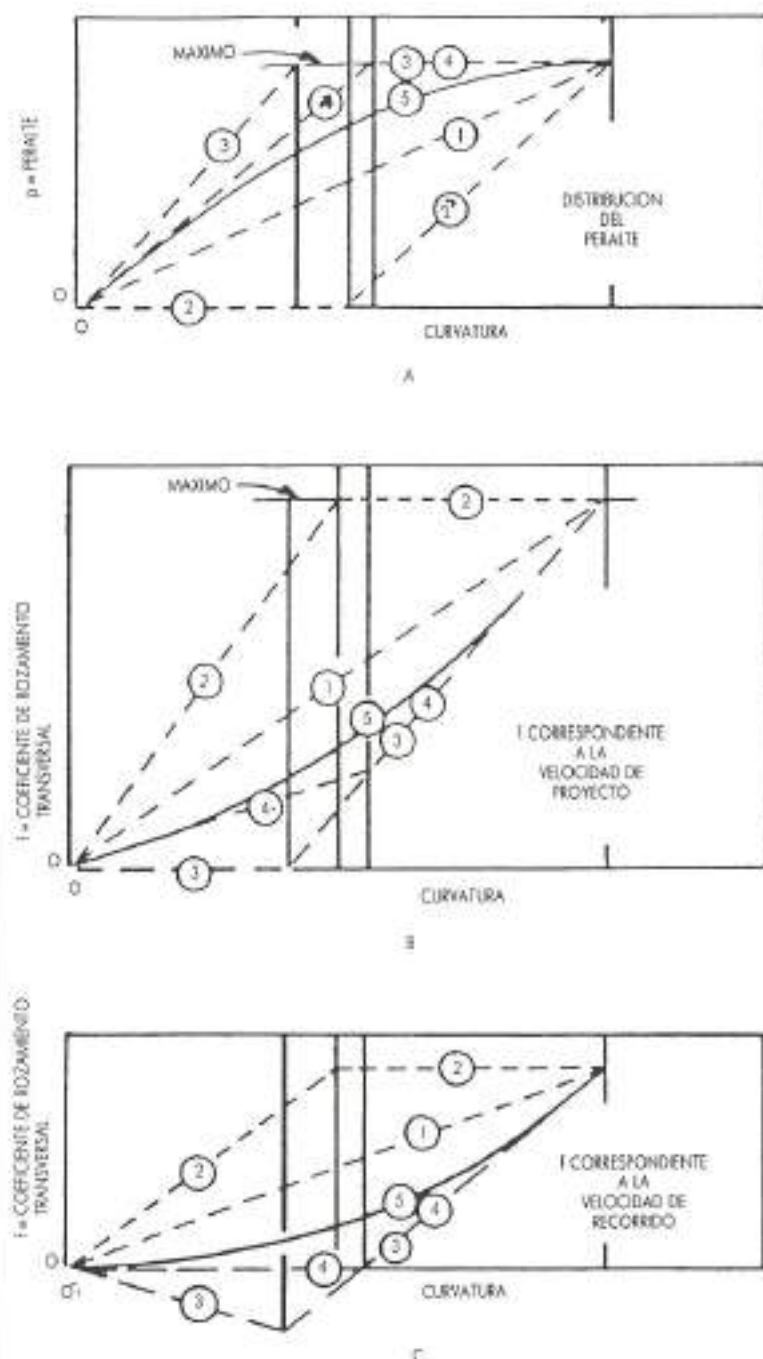
2.3. LA DISTRIBUCIÓN DEL PERALTE Y DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL EN FUNCIÓN DEL RADIO

El movimiento del vehículo en una curva viene gobernado por la ecuación [2]. La fuerza centrífuga se compensará tanto por medio del peralte como por medio del coeficiente de rozamiento transversal empleado. El problema que se plantea toda norma es el de establecer qué peralte (y , en consecuencia qué valor del coeficiente f)

se recomendará para cada valor del radio (una vez establecida una velocidad de proyecto). Este problema puede abordarse de varias maneras (7), según se ilustra en la figura 3:

(7) Vid. AASHTO (1984), A Policy... pág. 169.

Método 1. Consiste en considerar que tanto e como f son directamente proporcionales a la curvatura. La curvatura máxima ($D_{\text{máx}}$) (o radio mínimo) corresponderá al valor máximo del peralte y del coeficiente f . Entre $D = 0$ y $D = D_{\text{máx}}$ tendremos una recta. Este procedimiento implica, en la práctica, que se supone que la



Fuente: AASHTO (1984).

FIGURA 3. Diferentes métodos para distribuir p y f en función de la curvatura.

aceleración centrífuga se verá compensada en un porcentaje constante por el peralte y, en el porcentaje restante, por el rozamiento transversal.

Método 2. Suponer que f tendrá un valor tal que un vehículo circulando a la velocidad específica tendrá toda la fuerza centrífuga compensada por el rozamiento transversal, hasta llegar a una curva tan pronunciada que se alcance el valor $f_{\text{máx}}$; a partir de dicho momento, será necesario recurrir al peralte. La curvatura aumentará hasta que el peralte alcance el valor $p_{\text{máx}}$.

Método 3. Suponer que inicialmente la fuerza centrífuga se compensa con el peralte, hasta que se alcance el valor $p_{\text{máx}}$; a partir de ese momento, comenzará a colaborar el coeficiente f , hasta llegar al valor $f_{\text{máx}}$.

Método 4. Este método resulta similar al procedimiento 3, pero considera la velocidad media de recorrido, en lugar de la velocidad específica. En EE.UU. se considera que dicha velocidad es un porcentaje (entre un 83 % y un 100 %) de la velocidad específica, lo que justifica el aspecto de las curvas en este caso.

Método 5. En este caso se supone, tanto para p como para f , unas curvas parabólicas con valores intermedios entre los correspondientes a los procedimientos 1 y 3. La relación curvilíneas entre peralte y radio puede introducir consideraciones adicionales (p. e. de aspecto visual de la curva), lo que conduciría a una única relación peralte-radio independiente de la velocidad.

El método 1 tiene la ventaja de la simplicidad. Por otra parte, al ser constante el porcentaje de la aceleración centrífuga compensado por el coeficiente f , la relación $f \cdot D$ resulta similar tanto a la velocidad de recorrido como a la velocidad específica. Finalmente, un vehículo que viajara con velocidad uniforme se encontraría que el valor de f variaría desde 0 en recta a un valor máximo en las curvas más pronunciadas. El problema, sin embargo, estriba en el hecho de que los vehículos presentan una tendencia a circular a mayor velocidad en las rectas y curvas amplias, y a menor velocidad en las curvas cerradas; por consiguiente, sería deseable dar mayor peralte a las curvas de tipo intermedio.

El método 2 implica que las curvas de mayor radio no precisarían peralte. Una vez alcanzada la curvatura que emplea todo el coeficiente de rozamiento ($f_{\text{máx}}$), el peralte crecería muy rápidamente. Las recomendaciones de AASHTO consideran que este procedimiento puede ser interesante en circunstancias en que la velocidad de recorrido es poco uniforme o en las que existen dificultades para dar peralte a la curva (8).

El método 3 no requiere la intervención del rozamiento transversal en las curvas de mayor radio. Por el contrario, una vez alcanzado $p_{\text{máx}}$, el valor de rozamiento transversal aumenta rápidamente. El mayor problema estriba en que, si un vehículo circula a una velocidad inferior a la específica en curvas de radio amplio, requie-

rirá valores de f negativos, ya que tenderá a «caer» hacia el interior de la curva. Esta situación puede producir cierta incomodidad a algunos conductores.

El método 4 intenta superar el inconveniente planteado en el método 3 mediante el empleo de unos peraltes correspondientes a una velocidad inferior a la específica. En consecuencia, el peralte crece más despacio y el coeficiente f adopta valores positivos para un mayor número de vehículos.

Finalmente, el método 5 adopta una ley intermedia entre las propuestas por los métodos 1 y 4. En las curvas menos pronunciadas, el peralte se aproximará al valor indicado en el método 4, pues de esta manera no resultará peligroso conducir a velocidad elevada, ya que el peralte compensa buena parte de la aceleración centrífuga y se dispone de un rozamiento para poder compensar el resto de la aceleración. Por otra parte, al aproximarnos al método 1, evitamos tener un porcentaje grande de curvaturas empleando el peralte máximo (que plantea problemas a los vehículos más lentos). Una curva intermedia de tipo parabólico permite conjugar ambos compromisos.

2.4. PROCEDIMIENTOS DE DISTRIBUCION DE RADIO Y PERALTE EMPLEADOS EN DIFERENTES NORMAS

Las recomendaciones del Reino Unido (TD 9/81) emplean el método 1 del apartado 2.3. De esta manera, se indica que un 45 % de la aceleración centrífuga debe ser compensado con el peralte, y el 55 % restante por el rozamiento transversal. Por otra parte, se indica que la aceleración centrífuga total no debe superar el valor de 0,16 g (9), por consideraciones de seguridad y confort. Además de este mínimo absoluto, se establece un mínimo deseable correspondiente a la mitad del valor anterior.

La AASHTO emplea el método 5, ajustando una parábola de segundo grado para la curva de f entre las rectas correspondientes a los métodos 1 y 4, tal como se indica en la figura 4 para el caso concreto de $p_{\text{máx}} = 10\%$ y $v_{\text{espec}} = 30$ mph (48 km/h).

La norma alemana (RAS-L-1) también emplea el método 5, pero considera una distribución del peralte en función del radio de tipo semilogarítmico y dependiente de la velocidad. En la figura 5 se recoge esta distribución para el caso de carreteras principales (tipo A). La ley adoptada viene dada por la expresión:

$$\frac{p}{p_{\text{máx}}} = 1 - K \log \frac{R}{R_L} \quad [3]$$

R_L = Radio límite, a partir del cual corresponde un valor máximo del peralte.

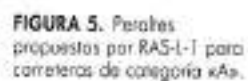
Con $K = 1,09$. El valor de R_L depende de la velocidad específica, lo que da lugar a curvas diferentes.

(8) Circunstancias que aparecen generalmente en carreteras urbanas.

(9) 0,22 g en caso de emplazamientos especialmente difíciles, siempre que se trate de carreteras secundarias (tipo B).



FIGURA 4. Distribución de p y l en función de la curvatura en AASHTO (1984)



Finalmente, la nueva instrucción española emplea un procedimiento similar al de la norma alemana, si bien en este caso el valor de R_L resulta independiente de la velocidad, ya que sólo depende del tipo de carretera considerado, tal como se indica en la figura 6. De esta manera, se obtiene una relación única radio-peralte, independientemente de la velocidad. Esto parece estar en consonancia con el comportamiento del conductor, que suele elegir su velocidad de entrada en la curva de acuerdo con el aspecto que ésta le ofrece, es decir, considerando sólo su radio y no su peralte.

3. COMPARACION DE LAS PROPUESTAS DE LAS DIFERENTES NORMAS

3.1. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL

La mayoría de las normas analizadas proponen una ley de variación del valor máximo del coeficiente de rozamiento transversal en función de la velocidad. Una excepción es la norma británica, que no recoge estos valores directamente. Sin embargo, pueden calcularse a través de los valores que asigna dicha norma al «radio mínimo» correspondiente a cada velocidad (10).

Estos valores se recogen en la tabla 1. Como puede observarse, los valores máximos del coeficiente f dismi-

nuyen al aumentar la velocidad, excepto en el caso de la norma británica, en el que se mantiene constante. Esto se debe a la imposición, en dicha norma, de que la aceleración centrífuga no supere un valor de 0,11 g (deseable) y de 0,16 g (absoluto) por razones de confort. Al combinar dicha limitación con la imposición de que el 55 % de la aceleración centrífuga sea compensada por el coeficiente f , se obtiene un valor de $f_{\text{máx}}$ constante. Estos valores resultan además pequeños con respecto a los de otras normas.

La norma alemana propone un coeficiente de rozamiento transversal igual a un 92,5 % del longitudinal. Este último viene dado en función de la velocidad. En el cálculo del radio mínimo considera que de ese valor $f_{\text{máx}}$ sólo se emplea un 50 % (parámetro n). Por ello, en la tabla se ha recogido el valor del coeficiente máximo de rozamiento longitudinal y un 50 % del valor máximo del coeficiente de rozamiento transversal.

Tanto la expresión de AASHTO como la de la Instrucción 3.1-IC (1990) emplean dos rectas de pendiente negativa, con quiebro en 80 km/h en el caso de AASHTO y en 100 km/h en el caso del nuevo borrador de la 3.1-IC. Esta última ha disminuido el valor de $f_{\text{máx}}$ en los valores más altos de la velocidad con respecto a la Instrucción de 1964. La misma relación se observa con respecto a la norma de AASHTO y a la alemana.

Por consiguiente, nos encontramos ante una distribución de $f_{\text{máx}}$ conservadora en las velocidades altas y optimista en las velocidades inferiores.

$$(10) \text{ Ya que } \frac{V^2}{127 R_{\text{mín}}} = e_{\text{int}} + f_{\text{máx}}$$

VELOCIDAD (km/h)	fmx						
	3.1-IC 1964	3.1-IC 1990	RAS-L-1 max fr	RAS-L-1 n = 50 %	TD9/81 DESEABLE	TD9/81 ABSOLUTO	AASHTO
30	0,210	0,2075	0,4423	0,2045	0,0612	0,0866	0,1713
40	0,191	0,1893	0,3932	0,1819	0,0612	0,0866	0,1650
50	0,171	0,1711	0,3485	0,1612	0,0612	0,0866	0,1588
60	0,156	0,1529	0,3080	0,1425	0,0612	0,0866	0,1525
70	0,148	0,1347	0,2719	0,1257	0,0612	0,0866	0,1463
80	0,141	0,1165	0,2400	0,1110	0,0612	0,0866	0,1400
90	0,135	0,0984	0,2123	0,0982	0,0612	0,0866	0,1275
100	0,126	0,0802	0,1890	0,0874	0,0612	0,0866	0,1150
110		0,0665	0,1699	0,0786	0,0612	0,0866	0,1025
120	0,112	0,0528	0,1552	0,0718	0,0612	0,0866	0,0900
130		0,0392	0,1447	0,0669	0,0612	0,0866	0,0775
140		0,0255	0,1384	0,0640	0,0612	0,0866	0,0650

TABLA 1. Valores máximos del coeficiente de rozamiento transversal (II) en varias normas.

VELOCIDAD (m/h)		3-I-IC 1964	3-I-IC 1976 (AU)	3-I-IC 1990 AU y AV	3-I-IC 1990 CTRAS. CONV.	RAS-L-1 TIPO A	TD9/81 DESEABLE	TD9/81 ABSOLUTO	AASHTO SIN NIEVE	AASHTO CON NIEVE
PERALTE MÁXIMO %		10	7	10-8	10-8	7 (8)	5	7	10	8
PERALTE MÍNIMO %		-2	-2,5	-2	-2	2,5	2,5	2,5	2	2
R.L. (m)	60	50		900	450	110	255	180		
	64								137	137
	70	50		900	450	160	360	255		
	80	50	250	900	450	240			213	229
	90	50		900	450	310				
	97								335	366
	100	50	400	900	450	410	720	510		
	110	50		900	450	510				
	113								488	610
	120	50	650	900	450	670	1020	720		
	130			900	450	800				
	140		900	900	450					

TABLA 2. Valores extraídos del peralte y radio-límite R_L .

3.2. RELACION PERALTE-RADIO

Para establecer una distribución de peraltes en función del radio de la curva, es preciso en primer lugar fijar un valor máximo (y mínimo) del peralte. En la tabla 2 se recogen estos valores.

Como puede observarse, la nueva Instrucción recoge dos valores máximos: 10 % y 8 %. El primero corresponde a vías sin problemas de hielo o nieve, y el segundo a vías en las que se presentan estos problemas; estos valores máximos coinciden con los propuestos en ambas circunstancias por la AASHTO.

Con respecto al resto de las normas, la nueva Instrucción plantea peraltes máximos superiores tanto a los de RAS-L-1 como a los de la TD 9/81, posiblemente debido a las condiciones climáticas más adversas de estos países.

La nueva Instrucción ha supuesto un incremento apreciable del peralte máximo en el caso de autopistas y autovías, lo que posibilita el empleo de radios algo menores en los trazados de este tipo de vías.

Asociado al peralte máximo está el concepto de radio límite (R_L) o valor del radio a partir del cual el peralte es igual al peralte máximo.

Todas las normas, salvo la española (11), relacionan el valor de R_L con la velocidad, de manera que al incrementarse v , crece también R_L . La norma española, por el contrario, propone dos valores: 900 m para autopistas y autovías y 450 m para carreteras convencionales. Estos valores resultan superiores a los de la normativa

española anteriormente vigente (12). Comparando con las instrucciones de otros países, se observa que estos valores de R_L son similares a los correspondientes a las distribuciones de radio-peralte con mayor velocidad. Por consiguiente, podemos afirmar que la distribución de peraltes en la Norma española no alcanza su valor máximo hasta valores del radio elevados, presentando un amplio intervalo en el que el peralte varía. De esta manera la variación entre el peralte mínimo y el peralte máximo se realiza con un gradiente similar al de otras normas, a pesar del valor más elevado de este último en la instrucción española.

La tabla 3 recoge los peraltes recomendados por las diferentes instrucciones para algunos valores del radio. Como ya se ha expuesto, en la mayoría de estas normas la ley de distribución de peraltes es distinta según la velocidad específica considerada. Por ello, en la tabla 3 se han recogido los valores correspondientes a 80 km/h, 100 km/h y 120 km/h (13). En la nueva instrucción española, por el contrario, se emplea una distribución única del tipo:

$$\frac{p}{p_{\max}} = 1 - K \log \left(\frac{R}{R_L} \right)$$

Con $K = 1,05$.

La nueva Instrucción ha incrementado los valores recomendados del peralte para un mismo radio con res-

(11) Tanto la de 1964 como el nuevo borrador de 1990. No así la norma de trazado de autopistas de 1976.

(12) En el caso de autopistas, 900 m era el valor correspondiente a la mayor velocidad (140 km/h).

(13) 50 mph (80 km/h), 60 mph (97 km/h) y 70 mph (113 km/h) en el caso de AASHTO.

CARRETERAS

RADIO [m]	3.1-IC AUTOPISTA			3.1-IC 1964	3.1-IC (1990)			
	A80	A100	A120		AUTOP. Y AUTOVIAS		CTRAS. CONVENCIONALES	
					SIN NIEVE	CON NIEVE	SIN NIEVE	CON NIEVE
250	7,0	—	—	6,5	10,0	8,0	10,0	8,0
500	4,3	5,8	—	4,5	10,0	8,0	9,5	7,6
900	3,0	3,7	5,0	3,0	10,0	8,0	6,8	5,5
1.000	2,8	3,5	4,5	2,5	9,5	7,6	6,4	5,1
1.500	2,4	2,7	3,4	2,0	7,7	6,1	4,5	3,6
2.000	2,1	2,4	2,9	2,0	6,3	5,1	3,2	2,5
2.500	±2,0	2,1	2,6	2,0	5,3	4,3	2,2	1,7
3.000	±2,0	±2,0	2,3	2,0	4,5	3,7	1,3	1,1
4.000	±2,0	±2,0	±2,0	2,0	3,2	2,5	0,0	0,0
5.000	±2,0	±2,0	±2,0	2,0	2,2	1,8	-1,0	-0,8

TABLA 3. Peraltes recomendados para diferentes radios.

RADIO (m)	RAS-L-1 Tipo A			TD9/B1			AASHTO p = 10 %			AASHTO p = 8 %		
	80	100	120	85	100	120	80	97	113	80	97	113
250	7.5(7)	8.0(7)	8.0(7)	7.0(5)	7.0(5)	7.0(5)	9.7	10.0	10.0	7.8	8.0	8.0
500	4.4	7.0	8.0(7)	5.1(5)	7.0(5)	7.0(5)	6.5	8.5	10.0	5.8	7.2	8.0
900	2.8	4.4	6.3	2.7	4.0	5.0(5)	4.1	5.6	7.0	3.6	4.9	6.5
1.000	2.6	4.0	5.9	2.6	3.6	5.1(5)	3.8	5.2	6.3	3.2	4.6	6.1
1.500	2.5	2.9	4.2	2.3	2.5	3.4	2.8	3.7	4.5	2.3	3.2	4.4
2.000	2.5	2.5	3.4	2.3	2.5	2.6	2.2	2.9	3.6	1.9	2.6	3.5
2.500	2.5	2.5	2.8	2.5	2.5	2.5	±2.0	2.1	2.5	±2.0	2.0	2.8
3.000	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	±2.0	±2.0	2.1	±2.0	±2.0	2.4
4.000	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	±2.0	±2.0	±2	±2.0	±2.0	±2.0
5.000	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	±2.0	±2.0	±2	±2.0	±2.0	±2.0

TABLA 3 (Continuación). Peraltes recomendados para diferentes radios.

pecto a la Instrucción anterior. Esto se debe en parte al hecho de haber incrementado el valor máximo del peralte, y resulta especialmente significativo en el caso de autopistas. Por otra parte, la nueva Instrucción no corta la ley de peraltes en un valor mínimo (14), sino que

(14) Usualmente del 2 % o 2,5 % (tabla 2).

continúa hasta un valor de -2 % (15). Las otras instrucciones, por el contrario, plantean un peralte mínimo y, después, un valor del radio por debajo del cual se adopta la misma sección transversal que en una alineación recta.

(15) Correspondiente al bombeo en sección recta.

Con respecto al resto de normas, los valores del peralte también resultan elevados, especialmente en los radios mayores. La distribución propuesta resulta próxima a la de AASHTO para la mayor velocidad (113 km/h).

Por consiguiente, la nueva Instrucción plantea una ley de distribución de peraltes elevada, correspondiente a las mayores velocidades específicas.

3.3. RADIO MINIMO PARA UNA VELOCIDAD DADA

En la tabla 4 se recogen los valores de los radios mínimos para ciertas velocidades específicas. Estos valores se determinan introduciendo en la ecuación (2) los valores máximos del peralte y del coeficiente de rozamiento transversal.

La existencia de valores mínimos altos suele asociarse al encarecimiento de la construcción de la carretera, al obligar al empleo de radios más amplios para una misma velocidad de proyecto.

La nueva Instrucción obtiene valores del radio mínimo del mismo orden de magnitud que la Instrucción anterior, si bien algo superiores en el caso de autopistas. Estos valores son también del mismo orden de magnitud en el resto de normas analizadas. Este resultado se justifica por el hecho de que, a pesar de emplear peraltes generalmente superiores, los valores de f_{roz} en la nueva Instrucción son inferiores a los de la mayoría de normas analizadas.

4. CONCLUSIONES

La nueva norma de trazado realiza, en lo referente al trazado en planta de alineaciones circulares, una revisión profunda de las especificaciones contenidas en las instrucciones de 1964 y 1976. Esta revisión sigue una línea similar a las de las recomendaciones de la AASHTO y, en menor medida, de la RAS-L-1 y la TD 9/81.

Las principales novedades de la Instrucción se sitúan en el incremento del valor máximo del peralte y la introducción de una nueva ley de distribución de éstos en función del radio. Esta ley, a diferencia del resto de normas analizadas, resulta independiente de la velocidad específica, lo que parece estar en consonancia con el comportamiento del conductor en la curva.

En los valores máximos del coeficiente de rozamiento transversal, la nueva Instrucción propone valores ligeramente inferiores, en las velocidades más altas, a los contenidos en la Instrucción anterior y en el resto de normas analizadas. Esto supone que un mayor porcentaje de la aceleración centrífuga será compensado por el peralte, y asegura una conducción más cómoda y segura a los vehículos más veloces.

El valor máximo del peralte se ha situado en 10 % y 8 % según las condiciones climáticas, de la misma manera que en las recomendaciones de AASHTO y en la antigua Instrucción de 1964. Sin embargo, en el caso de autopistas, esto ha supuesto un aumento importante, ya que la Instrucción de 1976 lo situaba en un 7 %. El resto

VELOCIDAD (km/h)	3.1-IC AUTOPISTA		3.1-IC 1964	3.1-IC 1990				RAS-L-1 TIPO A n = 50 %, p _{max}
				AUTOPIST. Y AUTOV.		CTRA. CONVENCIONAL		
	NORMAL	ABSOLUTO		SIN NIEVE	CON NIEVE	SIN NIEVE	CON NIEVE	
30			25			20	25	
40			45			44	47	
50			75			73	78	
60			120			112	122	135
70			175			164	180	200
80	400	250	250	233	256	233	256	280
90			350	322	358	322	358	380
100	600	450	450	437	492	437	505	500
110				572	650	630	743	
120	900	650	800	741	854	958	1.149	800
130				986	1.237			
140	1.200	1.000		1.518	2.041			

TABLA 4. Radio mínimo para diferentes velocidades específicas.

VELOCIDAD (km/h)	TD9/81		AASHTO	
	DESEABLE	MINIMO	p = 10 %	p = 8 %
30			26	28
40			48	51
50	180	127	76	82
60	255	180	112	122
70	360	255	157	171
80			210	229
90			280	307
100	720	510	366	404
110			470	522
120	1.020	720	597	667
130			750	845
140			935	1.064

TABLA 4 (Continuación). Radio mínimo para diferentes velocidades específicas.

de normas estudiadas propone valores máximos inferiores, posiblemente debido a las condiciones climáticas en el Reino Unido y Alemania.

Otra novedad importante de la Instrucción se establece en los peraltes correspondientes a curvas de gran radio. Se propone una ley continua hasta llegar a un bombeo similar al de la alineación recta, en lugar de

establecer un valor mínimo (16) a partir del cual establecer dicho bombeo.

Tanto el valor del radio límite R_L como la ley de peraltes en función del radio resultan en la nueva Instrucción comparables a las leyes correspondientes a las mayores velocidades en las otras normas.

Finalmente, la nueva Instrucción obtiene valores del radio mínimo del mismo orden de magnitud que la Instrucción anterior, si bien algo superiores en el caso de autopistas. Estos valores son también del mismo orden de magnitud en el resto de normas analizadas.

5. BIBLIOGRAFIA

- AASHTO (1984): A Policy on Geometric Design of Highways and Streets; Washington D.C., AASHTO. (Revisado en 1990).
 BALAGUER, E. et al. (1988): Trazado de Carreteras; Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
 Department of Transport; Departmental Standard TD 9/81. Road Layout and Geometry. Highway Link Design; Londres, Department of Transport, 1981 (revisado 1989).
 Dirección General de Carreteras; Instrucción de Carreteras 3.1-IC. Características Geométricas. Trazado; Madrid, MOP, 1964.
 Dirección General de Carreteras; Instrucción de Carreteras. Norma Complementaria de la 3.1-IC. Trazado de Autopistas; Madrid, MOP, 1976.
 Dirección General de Carreteras; Instrucción de Carreteras 3.1-IC. Trazado; Madrid, MOP, 1990 (Borrador).
 Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV); Richtlinien für die Anlage von Strassen. Linienführung. Abschnitt 1. Elemente der Linienführung (RAS-L-1); Colonia, FGSV, 1984.
 KOSASIH, D.; ROBINSON, R., y SNELL, J. (1987): A review of some recent geometric road Standards and their application to developing countries; Transport and Road Research Laboratory (TRRL). Research Report n.º 114; Crowthorne (GB), TRRL.

(16) De 2 % o 2,5 % en la mayoría de las normas analizadas.