

Análisis geométrico y operacional de las curvas de bajo ángulo de deflexión



Geometric and operational analyses of low-deflection curves

José Luis Ulpiano Cogollos

Personal Investigador,
Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIIC),
Universitat Politècnica de València

Francisco Javier Camacho-Torregrosa

Profesor Contratado Doctor,
GIIIC, Universitat Politècnica de València

Alfredo García García

Catedrático,
GIIIC, Universitat Politècnica de València

En la presente investigación se pretende analizar la adecuación del diseño de curvas de bajo ángulo de deflexión en el diseño geométrico, abordando dicho estudio desde dos perspectivas: necesidad geométrica y operacional, y percepción por parte de los usuarios. Igualmente, serán analizadas las características de este tipo de curvas dentro de la red de carreteras española.

El primer análisis será realizado contrastando los diferentes requisitos que la Instrucción de Carreteras 3.1-IC impone para el diseño de curvas en planta, determinando qué opciones geométricas son imposibles, así como las implicaciones operacionales (no perceptuales) de los diseños permitidos y no permitidos. Dentro de este contraste se abordará también el análisis de la ratio de curvas que actualmente cumplen la Instrucción de Trazado, analizando una muestra de 354 curvas de bajo ángulo de deflexión en toda la geografía española.

Con el objetivo de analizar la percepción de los usuarios respecto de estas curvas, esto es, determinar científicamente qué configuraciones son más proclives a generar confusiones y, por lo tanto, deben evitarse, se procede al planteamiento de una encuesta a un grupo de usuarios. Esta segunda parte del estudio no está contemplada en el presente artículo, si bien los resultados de la primera sirven de base para su planteamiento.

This research focuses on the adequacy of low-deflection curves to Spanish guidelines. This analysis is performed from two different perspectives: geometry and operation, as well as driver perception. The prevalence and characteristics of these kind of curves within the Spanish road network will also be examined.

The first analysis will be done by comparing the different requisites for horizontal curves by the Spanish Standards. This analysis will show some geometric combinations that are not possible, as well as the operational implications of some design combinations within and beyond guidelines. In addition, a sample of 354 low-deflection horizontal curves distributed across the Spanish road network will be analyzed, to determine to what extent guidelines are met.

Despite geometric and operational compatibility of new solutions to low-deflection curves, an adequate driver perception must be fulfilled. An online survey will be used to gather driver feedback on a series of preselected curves, hence determining which combinations are more likely to induce erratic maneuvers and therefore must be avoided. While this second part of the research is not covered here, the curve sampling has been set based on these geometric and operational conclusions.

1. INTRODUCCIÓN

Según la vigente Instrucción de Trazado 3.1-IC (2016), el diseño geométrico en planta de carreteras se realiza mediante la combinación de tres tipos de elementos geométricos: rectas (curvatura nula), curvas circulares (curvatura constante), y clotoides (variación lineal de la curvatura respecto de su desarrollo). Estos tipos de elementos se combinan para generar un eje en planta que garantice condiciones de seguridad y confort.

Dentro de estos elementos, las rectas no producen aceleración transversal sobre los vehículos, mientras que las curvas circulares generan una aceleración transversal constante (siempre y cuando sea constante la velocidad de recorrido). Con el objetivo de controlar y laminar los saltos de aceleración transversal entre unas y otras se disponen curvas de transición, que en la Instrucción se materializan mediante clotoides. Estas clotoides presentan una variación lineal de la curvatura conforme a su desarrollo, suponiendo, por lo tanto, una transición lineal de aceleración centrífuga entre elementos geométricos de curvatura constante, si se mantiene la velocidad.

Así pues, la Instrucción de Trazado 3.1-IC establece que, como norma general y práctica más extendida, las curvas aisladas (esto es, entre dos alineaciones rectas), deben ser de Tipo I, compuestas por una curva circular entre dos clotoides simétricas. Estas clotoides deben presentar una longitud mínima, de tal forma que se garantice unas variaciones confortables de aceleración transversal (Criterio I) y de peralte (Criterio II).

Además de las limitaciones por aceleración transversal y transición del peralte, existen otros condicionantes de índole perceptual en el diseño de las curvas de transición. De hecho, el Criterio III.1 de la Instrucción establece que la variación de azimuth entre los extremos de una clotoide debe ser mayor o igual

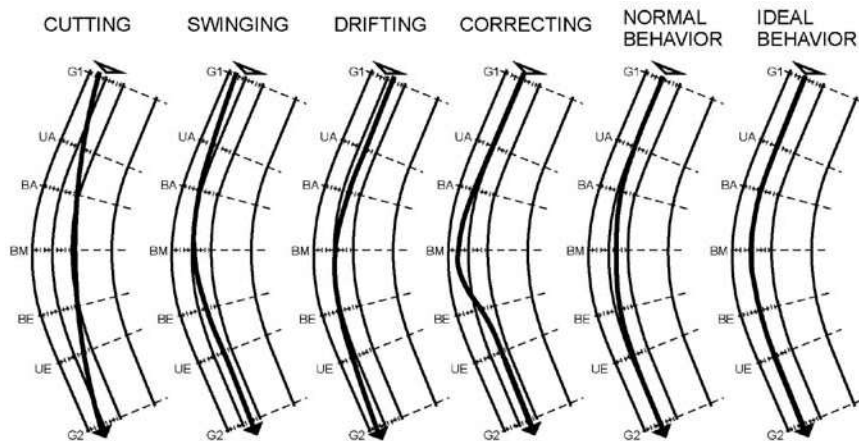


Figura 1. Clasificación de maniobras en curvas, propuesta por Spacek (2005)

a un dieciochoavo de radián (esto es, $\tau_{III,1} \geq 3.54^\circ$). El criterio III.2 implica que el retranqueo de la curva circular debe ser mayor o igual que 50 cm. Existe un criterio III.3, que supone que cada clotoide debe abarcar, como mínimo, una quinta parte del ángulo total de giro de la curva, aunque se trata de un criterio recomendable y no obligatorio.

Si bien la curva Tipo I es la más utilizada en la Instrucción, existen tres salvedades para las que se permite (o se exige) el diseño de una curva Tipo III, esto es, curva circular sin clotoides:

1. Curva circular de radio superior a 2500 m (en carreteras del Grupo 3), o superior a 5000 m (en carreteras de los Grupos 1 y 2). En este caso, la aceleración centrífuga es tan reducida que el salto de aceleración transversal es despreciable y puede realizarse sin transición.
2. Velocidades inferiores a 40 km/h (como trazados urbanos). En este caso, el salto de aceleración transversal es igualmente de muy poca entidad, no necesitando curvas de transición.
3. Curvas de bajo ángulo de deflexión. Cuando el ángulo entre las alineaciones rectas confluyentes es inferior a seis gonios, la Instrucción exige disponer una única curva circular, sin clotoides, limitando su desarrollo mínimo (y por tanto estableciendo un radio mínimo).

Precisamente, las curvas de bajo ángulo de deflexión suponen una problemática diferente al de las curvas de mayor ángulo. Al calcularse su longitud como el producto entre dicho ángulo (expresado en radianes) y el radio, un valor moderado del radio conducirá a desarrollos de la curva reducidos. Esto puede tener como consecuencia la percepción de un codo óptico, pudiendo generar maniobras erráticas por parte de los conductores en su aproximación. Por ello, gran parte de normativas dimensionan estas curvas a partir de su desarrollo mínimo.

Algunos autores han estudiado las maniobras realizadas por los conductores al recorrer curvas en planta. Spacek (2005) propuso una clasificación para los tipos de trayectorias más habituales. Algunos de estos tipos de trayectorias pueden considerarse voluntarios (por ejemplo, un recorte de curva trazando un radio más suave que el real), y otras de acción correctiva (generalmente tras una mala percepción, ya sea antes o dentro de la curva). La clasificación propuesta por este autor puede verse en la Figura 1.

Esta clasificación ha sido recientemente ampliada por Mauriello et al. (2018). En su estudio, analizaron en simulador de conducción 2000 trazadas en curvas en planta de diferentes radios (si bien con un ángulo de deflexión constante de 50 gon). Clasificaron el total de trayectorias en seis tipos, pero agregaron una clasifi-

cación de segundo orden, generando un total de 21 subtipos. Tanto el radio como el sentido de giro de la curva fueron factores influyentes en la elección del tipo de maniobra.

2. OBJETIVOS

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC), de la Universitat Politècnica de València, desarrolló entre los años 2014 y 2016 el proyecto de investigación CASEFU - "Estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales" (referencia TRA2013-42578-P). Dentro de sus objetivos, se encuentra el análisis de la geometría de las curvas de bajo ángulo de deflexión, así como su percepción y los efectos operacionales asociados. Este estudio cubre los siguientes cinco ámbitos:

- Análisis geométrico de las curvas de reducido ángulo de deflexión (esto es, las curvas de 20 gonios o menos, entre las que se encuentran las de bajo ángulo de deflexión).
- Análisis de los factores operacionales relacionados con las anteriores curvas.
- Muestreo de curvas en la red de carreteras en España, y determinación del grado de cumplimiento de la Instrucción.
- Análisis perceptual de dichas curvas, con el objetivo de determinar qué configuraciones pueden ser el origen de maniobras erráticas.
- Caracterización operacional de los conductores en determinadas curvas de bajo ángulo, propuesta de medidas de bajo coste y reevaluación operacional tras su implantación.

En el presente artículo se cubren los tres primeros aspectos: análisis geométrico y operacional (teórico) de las curvas de menos de 20 gonios, así como el análisis del cumplimiento normativo en una amplia muestra de curvas de carreteras convencionales en España.

3. ANÁLISIS TEÓRICO

3.1. Análisis geométrico

Considerando las restricciones que la Instrucción de Trazado 3.1-IC impone al diseño de curvas en planta de Tipo I, es posible calcular la clotoide de mínima para cada radio de curva circular. A partir de dicho resultado, y empleando la relación entre el ángulo girado por una clotoide y su longitud, puede determinarse el ángulo mínimo que debería tener una clotoide, en relación con el radio de la curva circular asociada (Figura 2) (consi-

derando en todo momento curva de Tipo I). En dicha figura se representan todos los criterios, habiendo desdoblado el criterio I (considerando la variación de la aceleración centrífuga recomendada, así como la máxima permitida) y el criterio II (en función de la velocidad de proyecto del tramo). No se incluye el criterio III.3 al no ser preceptivo.

En la Figura 2 se aprecia un importante efecto: a medida que el radio de la curva disminuye, el ángulo mínimo de la clotoide a disponer (y por tanto el mínimo ángulo de deflexión de la curva completa)

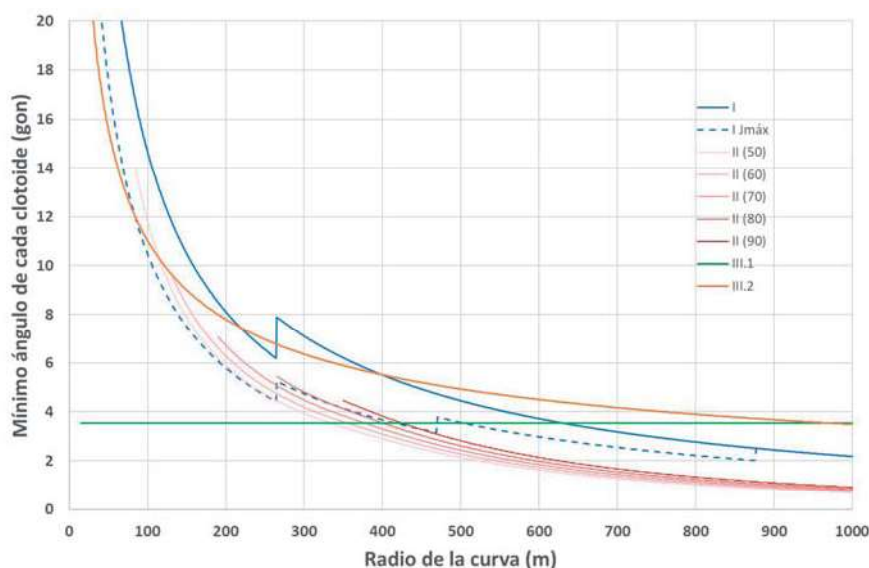


Figura 2. Ángulo mínimo que debe tener una clotoide, en función de los diferentes criterios. Grupo III.

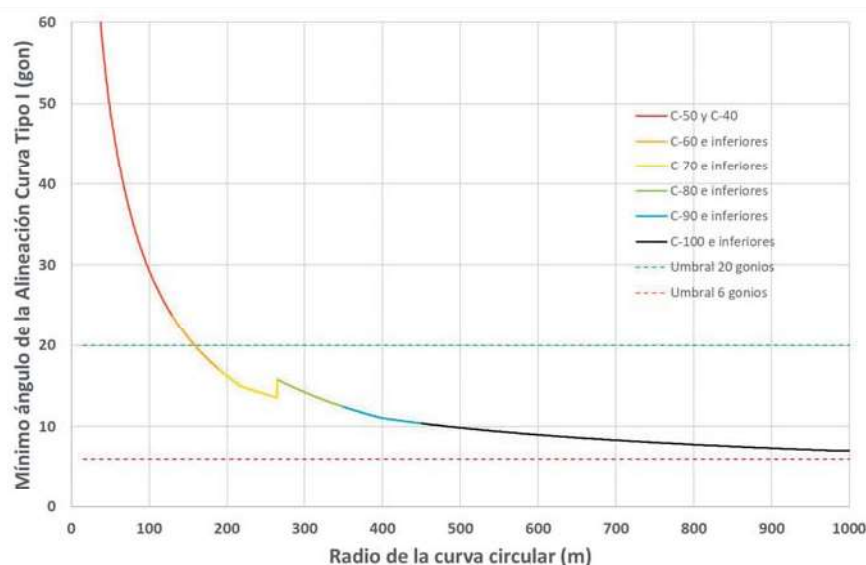


Figura 3. Ángulo de deflexión mínimo para cualquier alineación curva tipo I, en función del radio (las gráficas se van superponiendo a medida que aumenta el radio). Grupos II y III

aumenta. La Figura 3 muestra el ángulo mínimo que una curva Tipo I puede presentar (Ω , gon), asumiendo desarrollo nulo de curva circular (clotoides en punta) y combinando todos los criterios obligatorios para las curvas de transición. Para la aplicación del criterio I, se ha considerado una variación de aceleración centrífuga J y no $J_{máx}$, al entender que el uso de esta última debe reducirse únicamente a casos excepcionales. Igualmente, se han resaltado en diferentes colores según la velocidad de proyecto del tramo. A modo de ejemplo, las curvas con radios mostrados en naranja pueden disponerse para carreteras de tipo C-60, C-50 y C-40, pero no en C-70 y superiores.

En el apartado 4.4.5 de la actual Instrucción, se indica que, de forma general, el desarrollo mínimo de una curva más sus clotoides (Alineación Curva Tipo I) debe presentar un ángulo igual o superior a 20 gonios, pudiendo aceptarse valores entre 6 y 20 gonios. Estos dos umbrales se han resaltado en la Figura 3. De hecho, es imposible diseñar una curva tipo I con un ángulo inferior a 7 gonios cumpliendo todos los criterios, independientemente del tipo de carretera y de su grupo. Para radios inferiores a 160 m, todas las curvas adecuadamente diseñadas cumplen necesariamente con tener un ángulo de deflexión superior a 20 gonios.

Para aquellos casos en los que se necesita un menor ángulo de deflexión (inferior a 6 gonios), la Instrucción permite, en su apartado 4.4.8, utilizar curvas Tipo III, formadas únicamente por una curva circular sin clotoides. Existe siempre solución geométrica para este tipo de curva (siempre y cuando no solape con otros elementos geométricos), si bien hay limitaciones perceptuales: un radio muy pequeño puede ocasionar un codo óptico en planta, generando confusión en los conductores y, potencialmente, maniobras erráticas. Por ello, den-

tro del mismo apartado se establece una restricción a su desarrollo, lo que de forma indirecta afecta al radio:

$$D_c \geq 325 - 25 \cdot \Omega$$

Donde D_c es el desarrollo de la curva (m), y Ω su ángulo de deflexión, en gonios.

Este tipo de curva se puede aplicar para hasta 2 gonios, límite por debajo del cual no se permite diseñar, salvo en las proximidades a otras infraestructuras.

3.2. Análisis operacional

Operacionalmente, las curvas de bajo ángulo de deflexión suponen un cambio importante en cuanto a su fundamento. Las curvas Tipo I parten de la base de no superar cierto valor de rozamiento transversal, considerado como límite de las condiciones de seguridad y confort. El valor de la velocidad así determinado recibe el nombre de *velocidad específica*.

La limitación para curvas de bajo ángulo de deflexión es puramente de percepción visual (garantizar que no se produce un codo óptico), si bien también afecta a la operación

vehicular. Aplicando la relación con el radio, las velocidades específicas máximas que podrían llegar a alcanzarse en función del ángulo de deflexión, según la relación ofrecida por la Instrucción, vienen en la Figura 4.

Como puede observarse, las velocidades específicas para curvas de bajo ángulo de deflexión son muy superiores a las permitidas en España, por lo que los conductores siempre circularán en condiciones de seguridad y confort sobre las mismas. De hecho, podría extenderse la actual restricción de aplicación para curvas Tipo III hasta los 10 gonios, cifra para la cual la velocidad específica iguala los 100 km/h (trazos en rojo). Eso sí, la velocidad específica disminuye rápidamente a partir de este umbral (para los dos tipos de carretera).

Analizando las aceleraciones centrífugas en el paso por las curvas a diferentes velocidades (y no solo a la específica), se puede observar que las curvas de bajo ángulo tampoco suponen un problema, ya que su magnitud está muy por debajo de la generada por la velocidad específica (Figura 5). Al igual que en los casos anteriores, se ha extrapolado la función in-

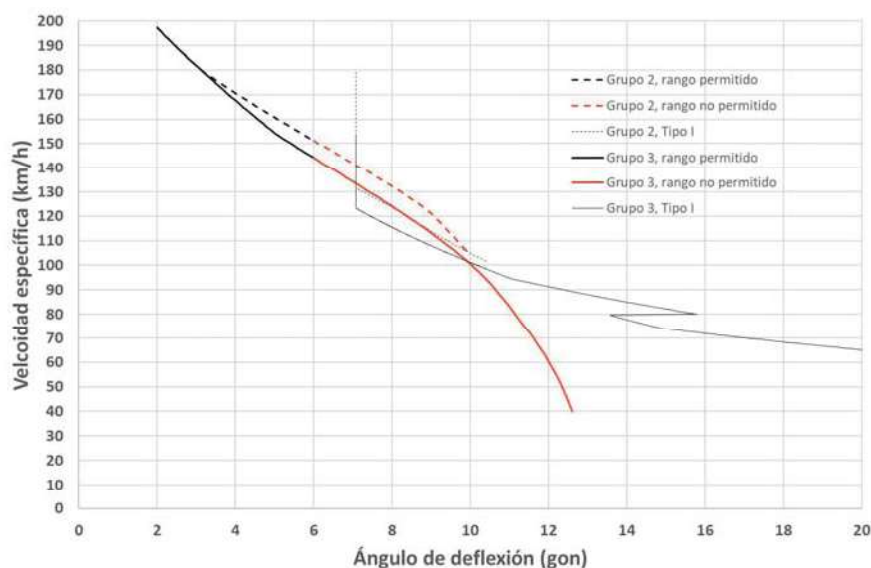


Figura 4. Velocidad específica en función del ángulo girado, para curvas de bajo ángulo (trazo grueso) y curvas Tipo I (trazo fino).

Estas curvas pueden disponerse en un gráfico ángulo-radio (Figura 8), donde también se han superpuesto los umbrales que la Instrucción de Trazado 3.1-IC permite disponer para las curvas en carreteras de los grupos 2 y 3, anteriormente calculados. Como puede observarse, un porcentaje nada despreciable de curvas estudiadas (tanto tipo I como tipo III) incumplen los criterios establecidos por la actual Instrucción. Resumiendo, todas las curvas tipo I por debajo del umbral presentan un ángulo girado incompatible con las clotoideas mínimas (o bien son más cortas, o bien no presentan clotoideas), mientras que los incumplimientos de las curvas tipo III son por presentar un desarrollo inferior al mínimo especificado.

De igual modo, resulta relevante que muchas de las curvas con deflexiones menores de 6 gonios presentan clotoideas no despreciables, si bien la curva tipo III equivalente (mismo ángulo de deflexión y desarrollo) difiere en poco de magnitud por el elevado valor del radio.

De las curvas superiores a 6 gonios, 127 de 284 incumplen, suponiendo un 44.7% del total. Este incumplimiento está distribuido tal y como aparece en la Figura 9. Como cabía esperar, el número de incumplimientos es especialmente elevado para ángulos reducidos (siendo obviamente el 100% de los casos entre 6 y 7 gonios, ya que el mínimo ángulo de giro permitido para una curva Tipo I es de 7.07 gonios y las curvas Tipo III solo se permiten para ángulos de giro de 6 gonios o menos). De hecho, la única opción de diseñar curvas dentro de este rango de ángulos que sean acordes con la Instrucción es disponer curvas Tipo III con radios mayores de 2500 m en carreteras del Grupo 3, o superiores a 5000 m en los otros dos grupos, casos para los que la Instrucción permite obviar las clotoideas.

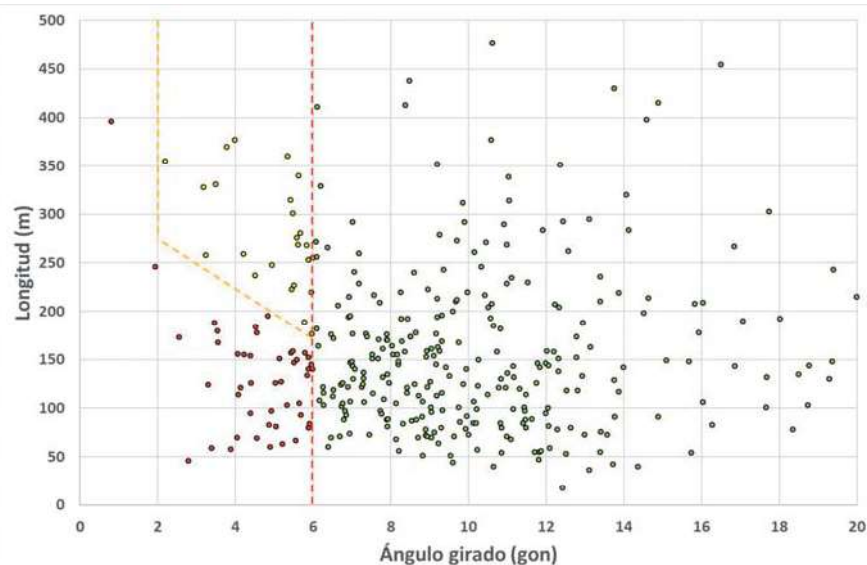


Figura 7. Distribución de ángulos y longitudes de las curvas objeto de estudio. Aparecen también representados los criterios de la Instrucción.

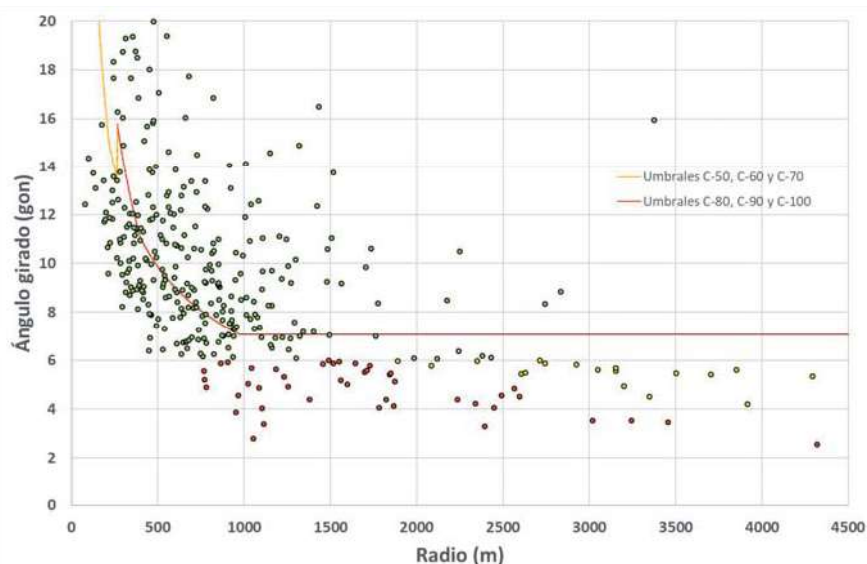


Figura 8. Distribución de ángulos respecto del radio.

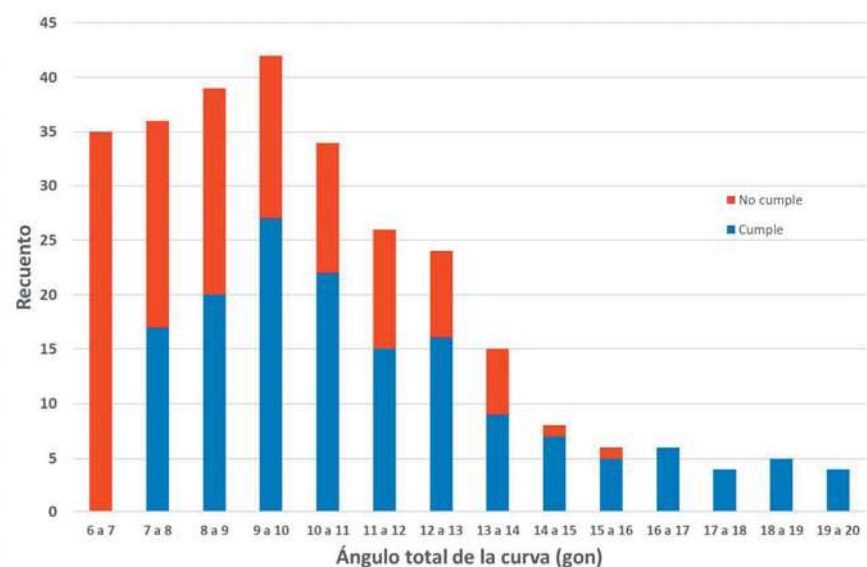


Figura 9. Distribución de incumplimientos para curvas superiores a 6 gonios, en función del ángulo total.

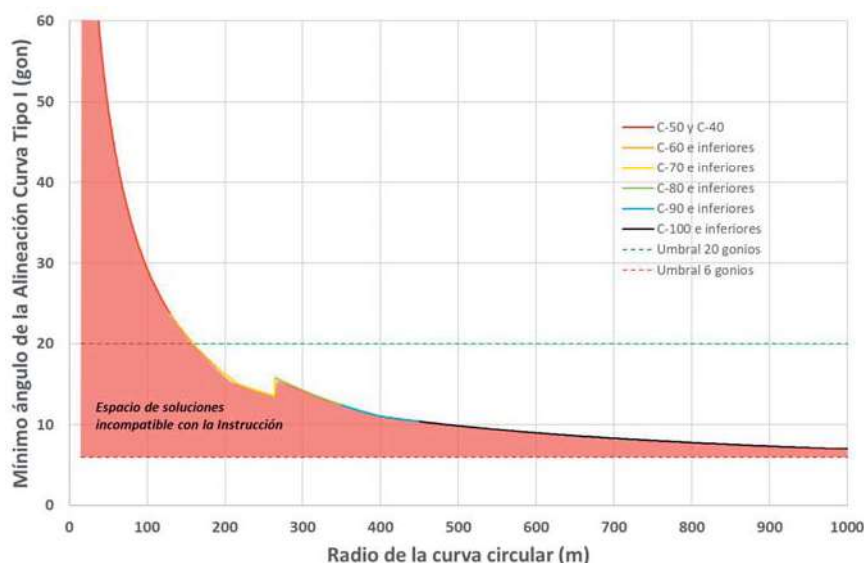


Figura 10. Distribución de incumplimientos para curvas superiores a 6 gonios, en función del ángulo total.

5. DISCUSIÓN

El análisis geométrico ha mostrado la imposibilidad, si se cumple la Instrucción 3.1-IC, de disponer curvas con clotoides para ángulos de deflexión relativamente bajos. Combinando las limitaciones de curvas Tipo I y Tipo III, existe un espectro bastante amplio de radios y ángulos para los cuales no existe la posibilidad de diseñar ninguna curva cumpliendo la normativa (Figura 10). Si bien esto puede no resultar problemático para radios elevados, sí es un condicionante altamente restrictivo para carreteras de menor entidad, donde encajar un menor ángulo de deflexión puede requerir aumentar el radio en un valor inasumible por encaje orográfico o en el entorno.

Si bien no existe solución geomé-

trica para estos casos, se ha analizado la posibilidad de extender ligeramente el criterio de disposición de curvas de bajo ángulo de deflexión más allá de los seis gonios. Operacionalmente sería viable, no suponiendo una afección relevante hasta aproximadamente los nueve gonios. Esto permitiría cubrir el espectro de diseño actual. De hecho, es imposible diseñar una curva entre 6 y 7 gonios con radio inferior a 2500 m con la actual Instrucción.

Aun así, quedaría por ver si el criterio de la Instrucción debe ser alterado, añadiendo o restando soluciones al espacio de validez. Este análisis debería hacerse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Operacional. Afección al rozamiento transversal movilizado o a la aceleración centrífuga.

- Perceptual. Determinación de si la geometría propuesta puede suponer la aparición de codos ópticos, falsas inflexiones, o algún otro problema que pueda generar maniobras erráticas.
- De comportamiento. Algunas geometrías, tal y como demostraron Spacek (2005) y Mauriello et al. (2018) pueden ser más propensas a que los conductores realicen una trazada fuera del carril, invadiendo parcialmente el carril opuesto o el arcén, según el sentido de giro.

Examinando las normativas de otros países, hay algunas que operan de forma similar a la española, limitando el desarrollo de las curvas de bajo ángulo en función del mismo. A modo de ejemplo, el Green Book de EE.UU., en su séptima versión (AASHTO, 2018), establece el siguiente desarrollo mínimo (adaptada en unidades) para curvas con un ángulo de deflexión de 5.55° o menores:

$$D_c \geq 300 - 27 \cdot \Omega$$

Donde la D_c es el desarrollo mínimo (en m), y Ω el ángulo de deflexión (en gonios).

Otro caso similar es el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de Colombia (Instituto Nacional de Vías, 2008), que también permite disponer una única curva circular entre alineaciones de seis grados o menos, presentando en este caso una relación tabulada entre el radio y el án-

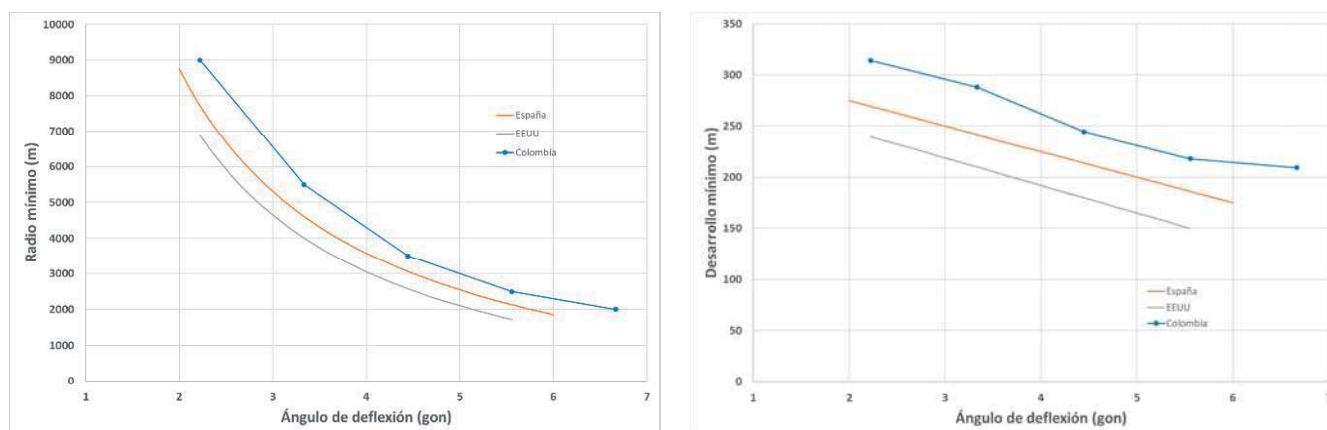


Figura 11. Mínimos radios (izquierda) y mínimos desarrollos (derecha) establecidos por las normativas española, estadounidense y colombiana para las curvas de bajo ángulo de deflexión.

gulo de deflexión aproximadamente parabólica.

La Figura 11 muestra las relaciones de desarrollos y radios mínimos para estas dos normativas, en comparación con la Instrucción 3.1-IC. Nótese que, si bien las relaciones difieren en recorrido, dominio y forma, sus órdenes de magnitud son similares.

Finalmente, hay otras normativas que controlan la visibilidad de las curvas en general (no solo las de bajo ángulo) estableciendo una relación entre su desarrollo y la velocidad de proyecto de la propia curva. Es el caso de la normativa italiana (Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, 2001), que establece un desarrollo mínimo de la curva igual a 2.5 segundos circulando a su velocidad de proyecto, o el Green Book, que impone un desarrollo mínimo (en metros) del triple de la velocidad de diseño del tramo (en km/h). Estos aspectos también podrían ser considerados para una posible futura revisión del criterio de diseño de curvas de bajo ángulo.

6. CONCLUSIONES

Se presenta un análisis geométrico y operacional de las curvas de bajo ángulo de deflexión, cubriendo además las curvas que, sin entrar en dicha categoría, también presentan un ángulo bajo.

Dicho análisis revela que existe un gran número de combinaciones de ángulo y radio para las cuales la actual Instrucción 3.1-IC no permite diseñar curvas, bien sea con clotoides o sin ellas. Estas combinaciones pueden ser necesarias en muchos casos, especialmente en zonas de mayor dificultad de encaje.

El análisis operacional arrojó que el actual criterio de desarrollo para las curvas de bajo ángulo de deflexión no impone restricciones relevantes para los conductores. Además, dicho criterio podría extenderse más allá de los seis gonios propuestos en la actualidad. Igualmente, la

comparación con otras normativas internacionales muestra relaciones similares, o bien haciendo depender su desarrollo de la velocidad de diseño de la curva o del tramo.

Se ha analizado una muestra de más de 350 curvas de bajo ángulo, escogida por toda la geografía española. Dicho análisis muestra que un porcentaje nada despreciable de curvas entre 6 y 20 gonios no se ajusta a la normativa actual en lo referente al diseño de las curvas de transición. En cuanto a las curvas inferiores a 6 gonios, un 45% de las examinadas presentan un desarrollo inferior al marcado por la Instrucción.

Los resultados anteriores indican la necesidad de plantearse el diseño geométrico en planta en lo tocante a la frontera de las curvas de bajo ángulo de deflexión. Si bien los resultados operacionales parecen indicar que hay posibilidades de ello, falta considerar el factor perceptual. Para ello, la última parte del estudio contempla la realización de una encuesta de percepción de curvas de bajo ángulo, mediante el visionado de vídeos circulando por una variada muestra de curvas en planta de este tipo, con el objetivo de situar la frontera de percepción adecuada de este tipo de curvas.

7. AGRADECIMIENTOS

La presente Investigación es parte del proyecto "CASEFU – Estudio experimental de la funcionalidad y seguridad de las carreteras convencionales" (referencia TRA2013-42578-P), cuyo objetivo es actualizar el modo en el que se diseñan las carreteras convencionales en España atendiendo a criterios de operación, seguridad y funcionalidad. Dicho proyecto fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Asimismo, también forma parte de la Tesis Doctoral de José Luis Ulpiano, contratado FPI (referencia BES-2014-069488) a cargo del anterior proyecto y financiado

por el citado ministerio y el Fondo Social Europeo.

8. REFERENCIAS

- [1] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) (2018). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book)*.
- [2] CAMACHO-TORREGROSA, F.J., PÉREZ-ZURIAGA, A.M., CAMPOY-UNGRÍA, J.M. GARCÍA, A. Y TARKO, A. (2015). *Use of Heading Direction for Recreating the Horizontal Alignment of an Existing Road*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 30(4), pp. 282-299.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Ministerio de Transporte, República de Colombia.
- [4] ISPETTORATO GENERALE PER LA CIRCOLAZIONE E LA SICUREZZA STRADALE (2001). *Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (Italia).
- [5] MAURIELLO, F., MONTELLA, A., PERNETTI, M. y GALANTE, F. (2018). *An Exploratory Analysis of Curve Trajectories on Two-Lane Rural Highways*. Sustainability 10:4248.
- [6] MINISTERIO DE FOMENTO. (2016). *Instrucción de carreteras 3.1-IC "Trazado"*. Ministerio de Fomento de España.
- [7] SPACEK, P. (2005). *Track Behavior in Curve Areas: Attempt at Typology*. Journal of Transportation Engineering – ASCE, vol. 131(9), pp. 669-676.
- [8] ULPIANO-COGOLLOS, J.L., CAMACHO-TORREGROSA, F.J. y GARCÍA, A. (2016). *Análisis del comportamiento de conductores en curvas de bajo ángulo de deflexión*. XII Congreso de Ingeniería del Transporte. Valencia, España. ❖