



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Consistencia del Diseño Geométrico de Carreteras: Concepto y Criterios

Apellidos, nombre	García García, Alfredo ¹ (agarcia@tra.upv.es) Camacho Torregrosa, Fco. Javier ² (fracator@tra.upv.es) Pérez Zuriaga, Ana María (anpezu@tra.upv.es)
Departamento	^{1,2} Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



1 Resumen

Con el diseño geométrico de una carretera hay que intentar lograr todos los objetivos del mismo, que son: la funcionalidad, la seguridad, la comodidad, la integración ambiental, la armonía o estética, la economía y la elasticidad de la solución final.

La seguridad vial ha de ser la premisa básica en cualquier diseño viario, reflejada principalmente en la simplicidad y uniformidad de los diseños, para que sean fácilmente perceptibles por los conductores y así puedan adaptar gradualmente su comportamiento a lo largo de la carretera. La seguridad no se logra limitándose a cumplir las normas de diseño geométrico porque estas tienen en cuenta e incorporan, de forma explícita o implícita, el resto de los objetivos, especialmente el económico.

Los accidentes de tráfico se producen por la concurrencia de diferentes factores (factor humano, infraestructura y vehículo, principalmente), siendo la infraestructura uno de los más importantes. La afección de dicho factor sobre la siniestralidad puede estudiarse mediante el concepto de consistencia del diseño geométrico. Este concepto está relacionado con la concordancia entre la geometría de la carretera y las expectativas que los conductores tienen de ella.

Por ello, hay que lograr un diseño geométrico consistente, que disponga los elementos de la vía y sus características geométricas contribuyendo a minimizar las violaciones de las expectativas del conductor, de modo que este perciba homogeneidad en el trazado y no sufra una variación brusca en el nivel de atención necesario para poder adaptarse a las condiciones geométricas cambiantes de la carretera.

Para evaluar la consistencia del diseño geométrico se han desarrollado diferentes criterios y metodologías, fuertemente relacionados con el nivel de siniestralidad. Los más empleados se basan en el análisis de las evoluciones de las velocidades de operación. Para ello, se emplea el perfil de velocidades de operación. Cuanto mayor sea la dispersión de las velocidades de operación más probabilidad hay que ese tramo sea más peligroso. Además, las reducciones bruscas de velocidad de operación suponen una mayor probabilidad de que en esa zona se concentren los accidentes.

Por tanto, el empleo del concepto y la aplicación de los criterios de consistencia en el diseño geométrico de una carretera, encamina el resultado final de forma directa hacia el objetivo de lograr una carretera que sea más segura. También tienen una gran utilidad para la evaluación indirecta de la seguridad vial de una carretera convencional que se encuentre en servicio, permitiendo orientar de forma acertada las mejoras del trazado que sean necesarias para que sea más segura.

2 Objetivos

El objetivo principal es que se comprenda el concepto de diseño geométrico consistente, como herramienta para evaluar y mejorar la seguridad vial previsible a la hora de desarrollar el diseño geométrico de la misma.

También se pretende consolidar el conocimiento de las referencias fundamentales que emplean los conductores para decidir sus niveles de velocidad conforme recorren las vías. Se trata de conocer los principales criterios y metodologías de



análisis de la consistencia desarrollados internacionalmente hasta el momento, y de identificar algunos criterios indirectos de consistencia en las normativas de trazado españolas.

3 Concepto de consistencia

El diseño geométrico es la parte más importante del proyecto de una carretera, estableciendo, en base a los condicionantes o factores existentes, la configuración geométrica definitiva del conjunto tridimensional que supone, para satisfacer al máximo los objetivos fundamentales.

Para ello, hay que llevar a cabo un proceso de diseño iterativo, donde se va conformando la geometría de la carretera a través de un modelo tridimensional que continuamente se evalúa, según todos los condicionantes y objetivos del diseño, para proceder a modificaciones en el mismo, buscando la optimización de la realidad física y funcional final.

Una de las principales formas de evaluar el nivel de seguridad asociado al diseño geométrico de una carretera es a través del análisis de su consistencia, especialmente en carreteras convencionales de calzada única.

El concepto de consistencia en el diseño geométrico está relacionado con el objetivo de lograr la máxima conformidad entre las características geométricas de la carretera y las operacionales resultantes, y las expectativas del conductor conforme la recorre [1].

Los conductores adoptan su evolución, principalmente su velocidad, en función de las características que perciben de la carretera y del entorno. Por tanto, la geometría de la misma condiciona de forma importante, pero también la orografía del terreno colindante y la densidad urbanística del entorno. No será igual la velocidad que esperen poder desarrollar en una autopista que en una carretera de calzada única, ni en una orografía llana que ondulada o accidentada.

Estas **expectativas de los conductores** pueden ser de dos tipos: **a priori**, referidas a las expectativas que un conductor tiene asociadas a determinados tipos de carreteras por su experiencia al volante, que le permiten conducir de forma previsible, especialmente en cuanto a los niveles de velocidad que espera poder desarrollar con comodidad y seguridad; y **ad hoc**, referidas a las expectativas que el conductor va adquiriendo conforme recorre un determinado tramo de carretera, adaptándose paulatinamente a las características percibidas de lo que se acaba de recorrer. Así, en función de las expectativas previas, el conductor requerirá un diseño coherente entre el tipo de vía y su geometría y equipamiento. Además, según las expectativas que se forman al recorrer el tramo de carretera, el conductor espera que el diseño presente una evolución continua y paulatina de sus características geométricas.

Al ser la consistencia la relación entre el comportamiento de la vía y lo que el conductor espera de la misma, un alto grado de consistencia implica que la carretera se ajusta mucho a las expectativas del conductor, por lo que no se generarán sorpresas. En cambio, una mala consistencia implica que el comportamiento que permite la carretera es muy diferente a dichas expectativas, generando sorpresas en el conductor y presentando por tanto un mayor riesgo potencial de aparición de accidentes.



En resumen, la definición más aceptada internacionalmente para un diseño geométrico consistente entiende que se trata de **minimizar las violaciones de las expectativas de los conductores**. Por tanto, los conductores demandan del diseño geométrico la máxima homogeneidad del trazado, que no se requiera de los conductores variaciones bruscas en su nivel de atención y la carga de trabajo que supone su conducción, y que les sea fácil adaptarse a las condiciones geométricas y operacionales, que siempre van a ser cambiantes.

De este modo, un diseño será consistente cuando los elementos geométricos que lo componen y su coordinación impliquen una conducción cómoda y libre de sorpresas. El cumplimiento de las diferentes normativas no asegura necesariamente que la carretera diseñada sea consistente.

4 Criterios de consistencia

La mayoría de las investigaciones relacionadas con la consistencia y sus modelos desarrollados se centran en cuatro ámbitos principalmente: la velocidad de operación y sus variaciones, la estabilidad del vehículo en curvas, los índices de trazado y la carga de trabajo del conductor. Entre ellos, los criterios más extendidos están basados en el análisis de la velocidad de operación y son los que se incluyen a continuación de forma detallada. Hasta el momento sólo son de aplicación en carreteras convencionales de una única calzada, que es donde se producen mayores oscilaciones de la velocidad a lo largo de su recorrido y, por tanto, hay más probabilidades de que haya un desajuste entre las velocidades que permite el trazado y las que esperan desarrollar los conductores.

La velocidad de operación es un parámetro de velocidad que representa la velocidad por la que optan los conductores, definiéndose para ello la velocidad de operación en un punto como el percentil 85 de la distribución de velocidades individuales en ese punto de vehículos ligeros circulando en flujo libre. Se considera que un vehículo circula en flujo libre cuando la elección de su velocidad no se encuentra condicionada por el vehículo precedente, de tal forma que el conductor puede desarrollar voluntariamente su velocidad en función de cómo percibe la vía y su entorno, sin que influyan otros vehículos o la meteorología adversa.

De los diferentes criterios o métodos de análisis de la consistencia, podemos distinguir entre los que llevan a cabo la **evaluación local** en cada uno de los elementos geométricos, especialmente en curvas, de los métodos para la **evaluación global** del conjunto del tramo que se esté diseñando o analizando.

Adicionalmente, se presentan algunos criterios indirectos de consistencia que aparecen en la normativa de trazado vigente en España.

4.1 Criterios locales

Los criterios locales de consistencia permiten evaluarla para un determinado elemento del trazado en planta, bien examinando la variación de las velocidades de operación a lo largo de la carretera o bien comparándolas con la velocidad de diseño o proyecto del tramo.

El método local de evaluación de la consistencia más extendido es el desarrollado por Lamm et al. [2 y 4]. Establecieron dos criterios de consistencia relacionados con la velocidad de operación, que incluyen la diferencia entre la velocidad de

operación y la de diseño (**criterio I**) y la diferencia de velocidad de operación entre elementos geométricos consecutivos (**criterio II**).

La Tabla 1 presenta los umbrales de consistencia para el criterio I. Establecieron unos umbrales (10 y 20 km/h) considerando las tasas de peligrosidad medias observadas en diferentes configuraciones. La diferencia entre velocidad de operación y la velocidad de diseño, permite la identificación de zonas del trazado cuyo diseño no se ajusta al trazado general de la carretera. Para ello, se emplea el perfil de velocidades de operación en cada sentido.

Buena	Aceptable	Pobre
$ V_{85,i} - V_d \leq 10$	$10 < V_{85,i} - V_d \leq 20$	$20 < V_{85,i} - V_d $

Tabla 1. Umbrales de consistencia del diseño. Criterio I de Lamm et al.

La Figura 1 muestra un ejemplo de aplicación del criterio I a un tramo de carretera convencional de 2550 m de desarrollo y velocidad de diseño 80 km/h. Como se puede observar en el perfil de velocidades de operación hay un tramo intermedio importante con consistencia pobre y cuatro zonas menores con consistencia aceptable.

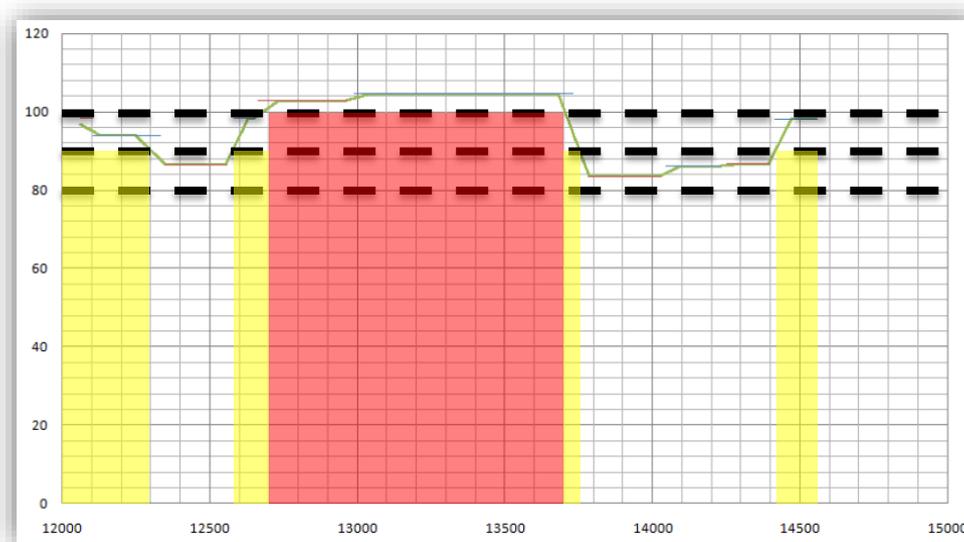


Figura 1. Ejemplo de aplicación del Criterio I

La Tabla 2 presenta los umbrales de consistencia para el criterio II. La reducción de velocidad de operación entre dos elementos consecutivos es una forma indirecta de cuantificar la sorpresa experimentada por los conductores, y se ha revelado como un indicador de consistencia muy sencillo y utilizado.

Buena	Aceptable	Pobre
$ V_{85,i} - V_{85,i+1} \leq 10$	$10 < V_{85,i} - V_{85,i+1} \leq 20$	$20 < V_{85,i} - V_{85,i+1} $

Tabla 2. Umbrales de consistencia en la velocidad de operación. Criterio II de Lamm et al.

La Figura 2 muestra un ejemplo de aplicación del criterio II a un tramo de carretera convencional de 2550 m de desarrollo y velocidad de diseño 80 km/h. Como se puede observar en el perfil de velocidad de operación, hay una curva en el P.K. 6+350 con consistencia aceptable, ya que el escalón de velocidades de operación es de 16 km/h, mientras que en el P.K. 7+650 hay otra curva con consistencia pobre, debido a que el escalón de velocidades de operación es de 29 km/h.

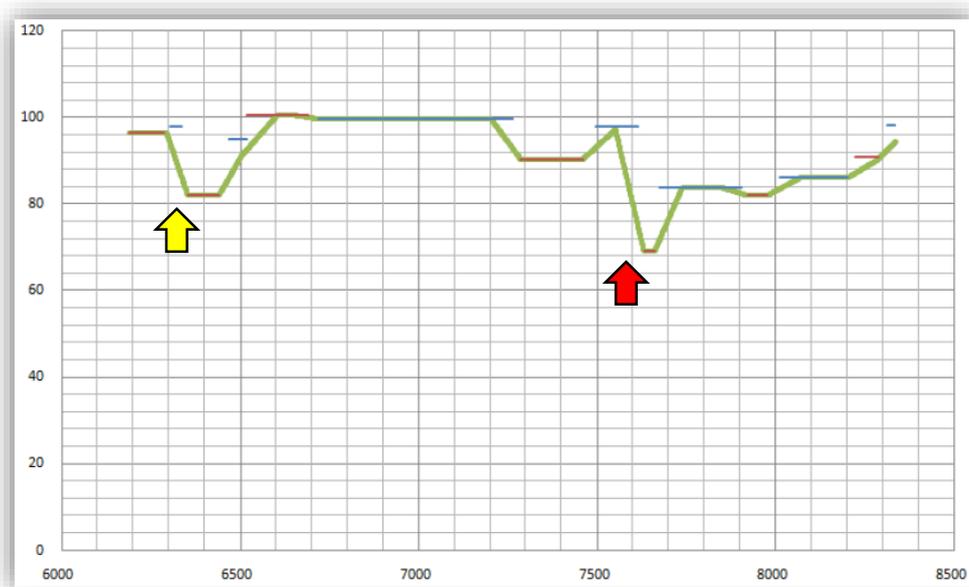


Figura 2. Ejemplo de aplicación del Criterio II

Un modelo reciente de García et al. [3] se basa en la hipótesis de que el comportamiento de la carretera en un punto puede estimarse por medio de la velocidad de operación en ese punto, mientras que las expectativas ad hoc de los conductores se pueden estimar por la velocidad de operación inercial, definiéndose como la media móvil de las velocidades de operación durante los 1000 metros anteriores. La diferencia entre ambos parámetros se ha denominado Índice de Consistencia Inercial (ICI).

Según este **criterio IIb**, la consistencia de una transición recta-curva puede considerarse buena si su ICI es menor de 10 km/h, aceptable si se encuentra entre 10 km/h y 20 km/h, y pobre si es mayor de 20 km/h (Tabla 3). En realidad se trata de un criterio que mejora el criterio II anterior, al tener en cuenta no sólo la velocidad de operación de la recta anterior, sino también en cierta forma el carácter continuo del tramo, por lo que modifica o adapta en continuo el criterio I, ya que la velocidad inercial supone una medida sustitutiva de la velocidad de diseño.

Buena	Aceptable	Pobre
$ V_{85 \text{ inercial},i} - V_{85,i} \leq 10$	$10 < V_{85 \text{ inercial},i} - V_{85,i} \leq 20$	$20 < V_{85 \text{ inercial},i} - V_{85,i} $

Tabla 3. Umbrales de consistencia inercial. Criterio IIb de García et al.



Al aplicar estos tres criterios locales, las recomendaciones serían las siguientes: en nuevos trazados, la consistencia debe ser buena; en la remodelación de trazados antiguos, se debería permitir una consistencia aceptable; y siempre que haya consistencia pobre, es necesario un rediseño del elemento, de los elementos afectados o, incluso, del tramo. En general, estos criterios son muy sensibles a los radios reducidos de curvas situadas en los extremos de rectas largas, ya que se propicia unos escalones demasiado grandes en las velocidades de operación. Por ello, cuando se establezcan rectas largas, sobre todo para facilitar el adelantamiento, hay que diseñar las curvas de sus extremos con radios holgados, normalmente no inferiores a 300 m.

4.2 Criterios globales

El motivo de dividir la consistencia en umbrales es el de indicar claramente cuándo debe actuarse sobre la vía y cuándo no. Sin embargo, la realidad se comporta de forma continua. Es por ello que otros investigadores sugieren emplear funciones continuas para determinar el grado de consistencia. Este es el caso de los trabajos realizados por Polus y Mattar-Habib [5] y Camacho et al. [6]. En ambas aproximaciones se considera de forma completa el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera, reflejando en cierta medida su dispersión. Se entiende que la dispersión en la velocidad de operación está ligada con los cambios en la carga cognitiva del conductor que supone la geometría de la vía, y que un elevado número de cambios en dicha carga cognitiva está asociado con una mayor siniestralidad. Cuanta mayor variación haya en las velocidades de operación a lo largo del tramo, más pendiente tendrá que estar el conductor para adaptar continua y adecuadamente su evolución.

En estos dos modelos, además, se calibró un indicador continuo de consistencia, en vez de utilizar umbrales. Dicho indicador se relacionó con la siniestralidad, por lo que empleando estos métodos es posible estimar el número de accidentes con víctimas del diseño geométrico analizado.

Pese a estas dos últimas ventajas, los modelos globales son menos utilizados que los locales debido a la dificultad de estimar el perfil continuo de velocidad. Además, los modelos locales permiten identificar la zona concreta donde se produce el problema de inconsistencia y así tener más claro donde mejorar el diseño. De todas formas, el uso de ambos tipos de modelos no es excluyente.

Polus y Mattar-Habib [5] desarrollaron dos nuevas medidas de consistencia. La primera se basa en el área por unidad de longitud (R_a), encerrada entre el perfil de velocidad de operación y la línea que representa el promedio de la velocidad de operación a lo largo del tramo. La segunda medida es la desviación estándar (σ) de la velocidad de operación a lo largo del tramo completo en estudio. En la Figura 3 se esquematizan ambos parámetros y en las ecuaciones 1 y 2 se desarrollan. En la Tabla 4 están los umbrales correspondientes.

$$R_a = \frac{\sum |a_i|}{L}$$

Ecuación 1

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (v_i - \bar{v})^2}$$

Ecuación 2

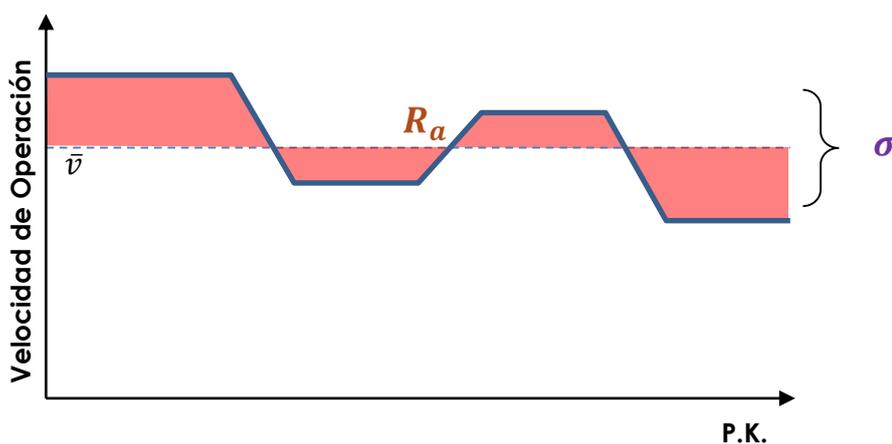


Figura 3. Esquema de aplicación del modelo global de Polus et al.

Parámetro	Buena	Aceptable	Pobre
R_a (m/s)	$R_a \leq 1$	$1 < R_a \leq 2$	$2 < R_a$
σ (km/h)	$\sigma \leq 5$	$5 < \sigma \leq 10$	$10 < \sigma$

Tabla 4. Umbrales para la determinación de la consistencia global de Polus et al.

A partir de estos dos parámetros, se desarrolló un modelo global de consistencia (ecuación 3) y se determinaron los umbrales correspondientes (C) que definen cuándo un trazado presenta consistencia buena, aceptable o pobre (Tabla 5).

$$C = e^{-0,278 \cdot [Ra(\sigma/3,6)]}$$

Ecuación 3

Parámetro	Buena	Aceptable	Pobre
C (m/s)	$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$

Tabla 5. Umbrales del modelo global de consistencia de Polus et al.

En España, Camacho et al. [6] desarrollaron un modelo global de consistencia basado en el análisis de 33 tramos de carretera. Para ello, se estimó el perfil de velocidad de operación de cada uno de los tramos y se relacionaron diferentes variables asociadas a este perfil y a otras características geométricas con la siniestralidad obtenida a partir de un análisis de los accidentes. A partir de este



estudio, se propuso el índice global de consistencia expresado por la ecuación 4, que es proporcional al cuadrado de la velocidad media de operación e inversamente proporcional a la media de los escalones negativos de velocidad de operación a lo largo del tramo. Los umbrales de consistencia fueron los mismos que los definidos en el modelo anterior: 1 y 2 m/s.

$$C = \frac{\bar{v}_{85}^2}{\Delta v_{85}}$$

Ecuación 4

4.3 Criterios indirectos de la normativa

La norma de diseño geométrico en España (Instrucción de Trazado 3.1 – I.C., 1999) [7] no recoge el concepto de consistencia de forma explícita, aunque presenta algunos criterios que de forma indirecta se pueden asociar a la consistencia.

Cuando se establece una limitación a la longitud de las rectas, se está pensando en que los vehículos no alcancen velocidades excesivas en ellas, entre otras razones, para que así el escalón de velocidad en las curvas de sus extremos no sea excesiva (art. 4.2). Aunque con rectas bastante más cortas ya se producen las velocidades deseadas por los conductores, que son sus máximas velocidades.

Relacionado con lo anterior, si la recta tiene un desarrollo mayor de 400 m, se exige un radio mínimo de las curvas finales de: 700 m para las carreteras del grupo 1 (AP, A y C-100) y 300 m para el resto (art. 4.5).

Un criterio similar, pero puramente geométrico, al criterio II, es la limitación de la proporción máxima de los radios de curvas consecutivas, para rectas menores o iguales a 400 m (art. 4.5).

La nueva Guía de Nudos Viarios [8] sí que incluye el concepto de consistencia, aunque no lo recoge de una forma específica y conjunta. Aparecen varias referencias a ella en diversas partes. Por ejemplo, se refiere a la confusión ante situaciones que pongan de manifiesto una falta de uniformidad y dificulten la legibilidad del itinerario, tales como una serie de enlaces con una sola salida por la derecha delante de la obra de paso, entre los que se intercala otro con una salida por la derecha detrás de ella.

El concepto de consistencia comprende la ausencia de cambios bruscos entre las características de elementos contiguos y la combinación de los elementos de manera que no se defrauden las expectativas de los conductores, evitando indecisiones y errores. Por ejemplo, las curvas cuyo estándar se desprege del conjunto pueden resultar problemáticas. La consistencia en el diseño de un itinerario mejora la seguridad, pues los conductores no se encuentran algo que no esperan.

Para valorar la consistencia del diseño del nudo se debe contemplar los aspectos concretos siguientes: situación, proximidad y secuencia de las conexiones (entradas y salidas) y demás convergencias y divergencias, bifurcaciones y confluencias; presencia de trenzados; facilidad de la señalización de orientación; claridad de los destinos y visibilidad de los carteles que los representan; claridad de las trayectorias que se deben seguir.

Sólo hay un criterio específico de consistencia, que dice: en las transiciones entre elementos contiguos cuya velocidad específica difiera en más de 15 km/h en



sentido descendente, muy frecuentes en los nudos viarios, se recomienda facilitarlas mediante ordenaciones de la circulación y ayudas a ella. En realidad, este no es un criterio de consistencia, sino de señalización y balizamiento, el cual está orientado hacia aumentar el riesgo percibido por los conductores, pero no a reducir el riesgo objetivo en sí. Para que fuera criterio de consistencia, debería proponer una mejora del diseño geométrico del ramal correspondiente para que no se rebase ese escalón de velocidades.

Otra recomendación sobre inconsistencias del trazado está relacionada con facilitar en exceso los accesos al nudo, estando por el contrario muy restringida la geometría en los mismos.

5 Cierre

A lo largo de este artículo se ha desarrollado el concepto de consistencia en el diseño geométrico de carreteras y se han expuesto los diferentes modelos y criterios de consistencia que se emplean internacionalmente. Finalmente, se llevado a cabo una asociación de estos con ciertos criterios de la normativa española de trazado, que de forma indirecta se asocian al concepto de consistencia.

6 Bibliografía

- [1] Pérez, A.M.; Camacho, F.J.; García, A. (2011). "La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial". Cuaderno Tecnológico de la PTC 6/2011. Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, Madrid.
- [2] Lamm, R.; Psarianos, B.; Mailaender, T. (1999). "Highway design and traffic safety engineering handbook". McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [3] García, A.; Llopis, D.; Camacho, F.J.; Pérez, A.M. (2013). "Nuevo índice de consistencia basado en la velocidad de operación inercial", Revista RUTAS, Asociación Técnica de Carreteras, vol. 154, pág. 19-27.
- [4] Lamm, R.; Beck, A.; Ruscher, T.; Mailaender, T.; Cafiso, S.; La Cava, G. (2007). "How to make two-lane rural roads safer. Scientific background and guide for practical application". WIT Press, Great Britain.
- [5] Polus, A.; Mattar-Habib, C. (2004). "New consistency model for rural highways and its relationship to safety". Journal of Transportation Engineering, vol. 130, 3, p. 286-293.
- [6] Camacho, F.J.; Pérez, A.M.; García, A. (2011). "New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation". 3rd International Conference on Road Safety and Simulation. Indianapolis, USA.
- [7] Ministerio de Fomento (1999). "Norma 3.1-IC Trazado". Orden de 27 de diciembre de 1999, Dirección General de Carreteras, Madrid.
- [8] Ministerio de Fomento (2012). "Guía de Nudos Viarios". O.C. 32/2012, de 14 de diciembre de 2012, Dirección General de Carreteras, Madrid.