



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Integración de la Consistencia en el Proceso de Diseño Geométrico de Carreteras

Apellidos, nombre	García García, Alfredo ¹ (agarciag@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

Puede definirse **consistencia** como el grado de ajuste entre el diseño de una vía y las expectativas de los conductores. Así pues, una carretera consistente será muy intuitiva para estos, no apareciendo sorpresas y, por tanto, redundando en una vía segura y con pocos accidentes. En cambio, una carretera inconsistente será aquella que presente sorpresas, implique muchos cambios de atención por parte de los conductores y, en resumen, derive en una mayor siniestralidad.

En la actualidad, en la mayoría de normativas y recomendaciones, se establecen unos criterios a seguir que definen unos umbrales que el diseñador debe respetar, generalmente basados en valores máximos o mínimos de diversos parámetros. Sin embargo, este procedimiento de diseño no tiene en cuenta el efecto que el mismo produce sobre los conductores, derivando en diseños inconsistentes aunque pueden ajustarse a la normativa.

En los últimos años ha aumentado muy significativamente el conocimiento que se tiene sobre la relación entre el diseño geométrico y la operación de los conductores, así como la consistencia. Así, es posible hoy en día estimar con una relativa fiabilidad el comportamiento esperado de los conductores en una carretera todavía no ejecutada, a través de la velocidad de operación. Por otra parte, existe una gran diversidad de modelos de consistencia, que permiten identificar tanto zonas puntuales del diseño con problemas, como estimar el número de accidentes que un cierto trazado tendrá.

Así pues, hoy en día estamos en disposición de aplicar estos nuevos conocimientos para la mejora del proceso de diseño de carreteras, así como utilizarlo para averiguar en qué casos es recomendable el rediseño de carreteras existentes.

2 Objetivos

El objetivo es proponer un nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales. En este nuevo proceso se pretende incorporar como paso intermedio fundamental el análisis de la seguridad vial de la carretera en diseño. Este análisis será principalmente desarrollado a partir de la consideración de los aspectos operacionales y de seguridad vial que se han expuesto. Asimismo, dichos procesos serán de tipo iterativo, con el objetivo de proponer soluciones que converjan a un diseño consistente.

3 El proceso de diseño geométrico de carreteras

El diseño geométrico constituye la parte más importante del proyecto de una carretera. A partir de unos condicionantes previos, se establece la configuración geométrica definitiva de la misma persiguiendo satisfacer al máximo los siguientes objetivos fundamentales: funcionalidad, seguridad, comodidad, integración ambiental, armonía o estética, economía y elasticidad.

Pese a que el resultado final presenta un aspecto tridimensional, su desarrollo no suele ejecutarse directamente así. Por ello, el proceso de desarrollo tradicional consiste en el diseño iterativo de un modelo tridimensional, en el que se tratan por separado cada una de sus partes o proyecciones pero, a su vez, se evalúa en cada paso su impacto sobre el conjunto completo, analizando el cumplimiento de la normativa y el conjunto de criterios u objetivos.



Es necesario tener en cuenta, además, que no todos los objetivos del diseño están en correspondencia, siendo algunos de ellos incluso contrapuestos. Esta imposibilidad de satisfacer la totalidad de los objetivos al mismo tiempo lleva a la necesidad de priorizar unos frente a otros. Además, el objetivo de seguridad vial tradicionalmente se ha limitado al mero cumplimiento de la normativa.

Existen numerosos factores o condicionantes del diseño, lo que hace necesaria su clasificación en externos (o previamente existentes) e internos (propios de la vía y su diseño). Entre los factores externos podría destacarse la orografía, geología y geotecnia, la demanda de tráfico, condicionantes urbanísticos y climatología. Como factores internos pueden citarse las velocidades o los efectos operacionales de la geometría (visibilidad, etc.).

3.1 La importancia de las velocidades en el proceso de diseño de carreteras

La velocidad esperada es quizás el parámetro de mayor peso en el proceso de diseño. Se trata de definir una velocidad de partida en la que poder basar el diseño de la vía. A esta velocidad se la conoce como **velocidad de diseño** internacionalmente, y como **velocidad de proyecto** en España. Su selección, se basa principalmente en la clase o tipo de carretera y en las características orográficas y urbanísticas del entorno.

Esta velocidad de diseño, constante para un tramo de carretera, condicionará los controles geométricos mínimos que se deben cumplir en el mismo, tales como el radio mínimo, parámetro mínimo de los acuerdos o distancias de visibilidad necesarias. El diseño de la vía se ejecutará posteriormente, respetando dichos parámetros.

Cuando surgió por primera vez el concepto de velocidad de diseño, en 1936 en Estados Unidos [2], fue bajo el supuesto de que los vehículos mantendrían dicha velocidad constante a lo largo del tramo. Sin embargo, en la práctica se comprueba que no es así, sino que los conductores adaptan su velocidad en función de los controles geométricos existentes, además de otras características perceptibles del entorno.

Como aspecto contrapuesto a la velocidad de diseño aparece la **velocidad de operación**, que puede definirse como la velocidad a la que operan los conductores en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales, esto es, siendo coartados exclusivamente por la geometría de la vía. Los conductores son desconocedores de la velocidad de diseño del tramo, y por ello se desenvolverán de forma variable, en función de la velocidad a la que consideran adecuado recorrer cada uno de los elementos geométricos. No debe entenderse la velocidad de operación como un valor único, sino como una distribución de velocidades, ya que depende de un gran número de parámetros geométricos, del entorno, sociales y de otro tipo. Es por ello que se suele asumir como velocidad de operación el percentil 85 de la velocidad desarrollada por los conductores en condiciones de flujo libre y sin restricciones ambientales. El uso de este parámetro está ampliamente extendido en el campo de la ingeniería del tráfico y de la seguridad vial. Esto es debido a que se considera que la mayoría de los conductores son responsables y, por tanto, que puede entenderse que el conductor correspondiente al percentil 85 de la velocidad puede caracterizar un comportamiento cómodo y prudente [3].

Durante el proceso de diseño de carreteras no se dispone de información sobre la velocidad de operación que los conductores desarrollarán, lo que hace necesaria su estimación. Para ello se hace imprescindible el uso de modelos empíricos, estimados



previamente a partir de los datos observados en tramos reales. Estos modelos deberán considerar variables geométricas y/o de otro tipo.

3.2 Carencias del actual proceso de diseño geométrico

El actual proceso de diseño geométrico presenta ciertas carencias, derivadas principalmente de la falta de armonía entre velocidad de diseño y velocidad de operación.

La velocidad de diseño impone un mínimo estricto en ciertas condiciones dentro de un tramo, como el radio mínimo o las distintas visibilidades necesarias. Sin embargo, en la mayor parte del tramo homogéneo las condiciones geométricas serán más suaves, por lo que la velocidad de operación tenderá a ser superior a la de diseño, lo que implicará un infradimensionamiento de las visibilidades exigidas al tramo.

Por otra parte, pese a que el conocimiento sobre las características operacionales de los conductores y su relación con la seguridad ha aumentado significativamente en los últimos años, estas evaluaciones no han sido incorporadas al proceso de diseño. Por ello, en muchas ocasiones el producto final presenta disparidades importantes en las velocidades, redundando finalmente en una mayor siniestralidad.

En cuanto a la fase de planeamiento, actualmente se consideran gran diversidad de parámetros en el análisis de soluciones, como la economía, impacto ambiental, capacidad y operación, longitud, etc. Sin embargo, la seguridad vial raramente es uno de dichos aspectos. Es por ello que debería incorporarse de una manera más directa, a ser posible, mediante un análisis de la consistencia de las alternativas propuestas y la estimación de su impacto sobre el número de accidentes futuro.

4 El proceso de tramificación de carreteras

En la mayoría de ocasiones, una carretera no presenta unos factores condicionantes constantes a lo largo de su traza, sino que son cambiantes, especialmente aquellos relativos a la orografía o al desarrollo urbanístico del entorno. Esto puede extrapolarse a que también debería escogerse una velocidad de diseño cambiante a lo largo de dicha traza, por lo que se hace necesario dividir la vía en tramos homogéneos. A este proceso se le conoce como tramificación. Cada tramo tendrá una velocidad de diseño única y no ser inferior a una determinada longitud (se recomienda al menos 2 km). La velocidad de diseño entre tramos consecutivos también deberá estar correctamente escalonada.

La metodología más simple para llevar a cabo la tramificación de una carretera se basa en la división de la vía considerando los nudos más importantes y los cambios en la sección transversal. Estos tipos de metodologías también tienen en cuenta la intensidad de tráfico como principal variable, pero obvian otros aspectos importantes, como la geometría.

Una de las principales metodologías para la identificación de tramos homogéneos que consideran la geometría de la carretera es la denominada metodología alemana [9]. Este procedimiento está basado en la representación gráfica del valor absoluto de los ángulos de deflexión acumulados de todos los elementos geométricos en planta. Posteriormente, este perfil se divide en secciones homogéneas con pendiente aproximadamente constante, que se corresponde con sinuosidad del trazado en planta



similar. Cada tramo homogéneo se caracteriza por el valor de su tasa de cambio de curvatura (CCR), definida según la ecuación 1.

$$CCR = \frac{\sum |\gamma_i|}{L}$$

Ecuación 1

Donde: CCR es la Tasa de Cambio de Curvatura; γ_i es el ángulo de deflexión de cada elemento geométrico; y L es la longitud del tramo de carretera. Esta tasa suele expresarse en gon/km. La longitud mínima recomendable del tramo de carretera es 2000 m. La figura 1 muestra un ejemplo de tramificación.

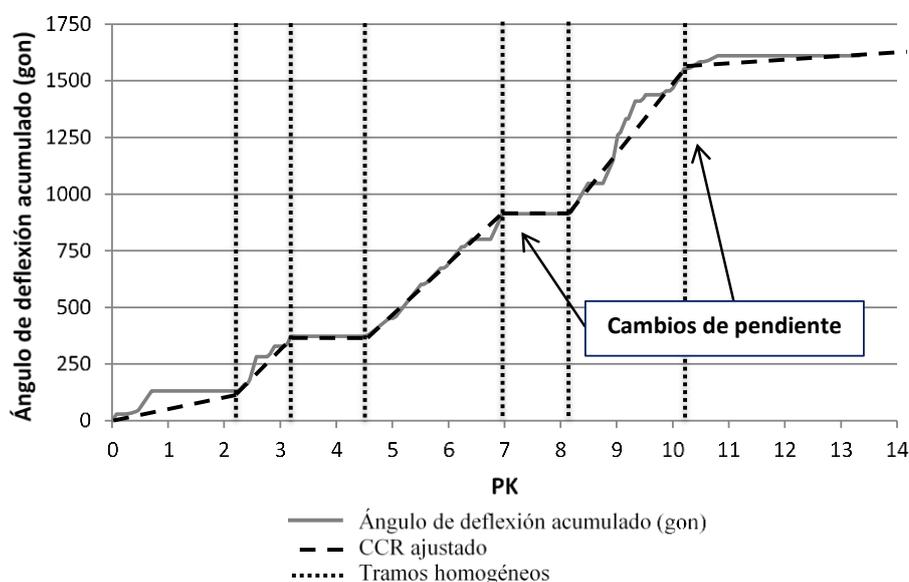


Figura 1. Ejemplo de tramificación según el método alemán

5 Integración de la consistencia en el proceso de diseño geométrico de carreteras

El actual conocimiento sobre la consistencia permite mejorar el proceso de diseño geométrico tradicional. Este proceso innovador pretende integrar gran parte de lo que hoy en día se conoce sobre el comportamiento de los conductores, así como la estimación de la siniestralidad por medio de la consistencia. De este modo se pretende que el diseño conseguido no sólo se ajuste a unas determinadas normativas, sino que también vaya más allá y produzca diseños muy intuitivos para los conductores, redundando en una mayor seguridad.

5.1 Carreteras de nuevo diseño

Básicamente, el proceso de diseño que se plantea pretende incorporar la seguridad en el proceso de diseño por medio de ajustar dicho diseño al comportamiento de los conductores. La figura 2 muestra el diagrama de flujo del nuevo proceso de diseño planteado para carreteras de nueva creación.



El proceso de diseño es similar al tradicional, pero incorporando de forma iterativa la estimación del comportamiento de los conductores y la consistencia, hasta garantizar que el diseño proyectado presenta una buena consistencia. Así pues, el primer paso es que el diseñador escoja una velocidad objetivo anticipada, que supone la base de la velocidad de diseño. Esta velocidad objetivo debe estar basada en las expectativas que los conductores pueden tener según la funcionalidad de la vía dentro de la red de carreteras, la orografía y el desarrollo urbanístico, entre otros factores. A partir de esta velocidad de diseño inicial, teniendo en cuenta los controles de diseño asociados y la normativa, se desarrollará un primer diseño geométrico.

El siguiente paso, pues, consiste en determinar si el diseño proyectado es seguro o necesita modificaciones. Para ello, el primer paso es estimar los perfiles de velocidad de operación (tanto en el sentido de ida como en el de vuelta), mediante los modelos correspondientes. En España ya existen modelos y reglas de construcción a este respecto.

El paso siguiente consiste en la determinación del nivel de consistencia del tramo, a partir de sus perfiles de velocidad de operación. Se recomienda la aplicación de, al menos, los siguientes criterios:

- Modelos locales que consideren el diferencial entre la velocidad de operación y la de diseño. Un ejemplo sería el criterio I de Lamm et al.
- Modelos locales que evalúen la disminución de la velocidad de operación entre elementos consecutivos, como puede ser el criterio II de Lamm et al.
- Modelos inerciales, que pueden considerarse como un término medio entre los dos anteriores. Un ejemplo sería el ICI de García et al. Permitirían encontrar diferenciales importantes entre la velocidad de operación y las expectativas de los conductores, representada por la velocidad inercial, que no hubieran sido detectadas por los anteriores modelos.
- Modelos globales, que consideran la variabilidad de la velocidad de operación dentro de un tramo homogéneo de carretera. En este caso no se ha definido tramo homogéneo, por lo que se aplicaría sobre la totalidad.

Únicamente en el caso de que todos los modelos arrojasen un buen valor de la consistencia, podría darse como bueno el diseño. En cualquier otro caso se debería proceder de forma iterativa para la mejora de la solución propuesta. En este último supuesto, en primer lugar se debe comprobar si el diseño previo se corresponde con uno o varios tramos homogéneos. Para ello existen diversos criterios de tramificación, como el método alemán o el criterio inercial.

En caso de que se trate de un tramo único, el diseñador tiene la posibilidad de actuar de dos modos: o bien alterando la velocidad de diseño, por considerarla poco apropiada, o bien dejarla inalterada y actuar directamente sobre el trazado. Tras ello, deberá volver a evaluar la consistencia y así iterativamente.

En caso de que la vía se componga de varios tramos, deberá seleccionarse una velocidad de diseño para cada uno de ellos, y proceder posteriormente a un diseño geométrico tentativo de cada uno. Es importante recordar que no pueden establecerse saltos muy importantes de velocidad de diseño entre tramos consecutivos (no más de 20 km/h).

Para cada uno de los tramos deberá desarrollarse el perfil de velocidad de operación correspondiente, y evaluarse la consistencia considerando criterios locales y globales. Si no se obtiene una consistencia buena, el diseñador deberá plantearse la posibilidad de cambiar la velocidad de diseño y/o el propio diseño geométrico.

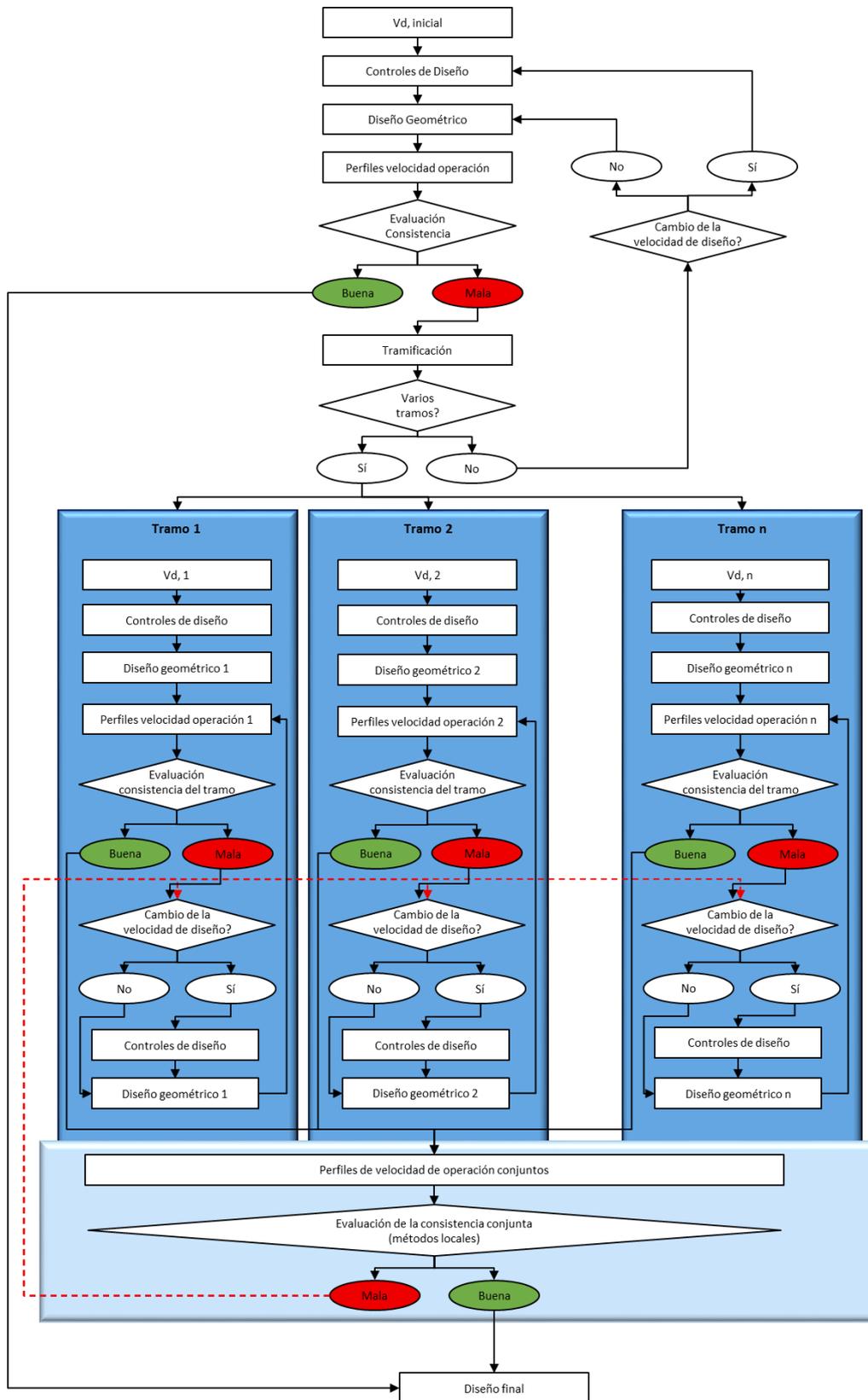


Figura 2. Nuevo proceso de diseño geométrico seguro de carreteras convencionales



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Sólo en el momento en que todos los tramos presenten una consistencia buena, se procederá a determinar los perfiles de velocidad de operación para todo el conjunto y aplicar criterios de consistencia locales. En principio, la consistencia general de la carretera debería ser buena. En caso contrario, y en función de qué tipo de inconsistencia se produzca, el diseñador deberá volver al paso anterior y modificar los tramos correspondientes, volviendo a iniciar el proceso, reconsiderando las velocidades de diseño de los mismos. La Figura 2 muestra de forma esquemática el proceso.

En fase de explotación deben tomarse mediciones de velocidad de operación y de distancias de visibilidad disponibles, que permitan definir un perfil de cada una de estas variables a lo largo de la carretera.

Tomando como base los perfiles de velocidad de operación real de la vía y los perfiles de distancias de visibilidad disponibles, se debe proceder al establecimiento de los límites de velocidad. De esta forma, se alcanzará el concepto de armonía de velocidades, dando como resultado un diseño de la carretera más seguro del que se obtiene en la actualidad a partir de la simple comprobación geométrica del trazado con base en las normas.

5.2 Rediseño de carreteras existentes

La metodología presentada permite su adaptación para el caso de rediseño de carreteras, aunque con ligeras variaciones. Generalmente, el rediseño de una carretera viene motivado por la detección de un número de accidentes de tráfico superior al que cabría esperar, lo que en principio sugiere una implicación por parte del factor infraestructura.

La primera gran diferencia es que no se parte de una velocidad de diseño, sino que esta se infiere a partir de su geometría. Así pues, el primer paso consiste en restituir geoméricamente la carretera a estudiar, y determinar cuál es la velocidad de diseño inferida.

A partir de este momento, se procede como en el caso de diseño de un nuevo tramo. Así pues, tras evaluar su consistencia se tramificará. En caso de ser un único tramo, el diseñador deberá plantearse si la velocidad de diseño inferida es adecuada o conviene alterarla, o debe proceder directamente con el rediseño. En caso de ser varios tramos, deberá inferir la velocidad de diseño para cada uno de ellos y evaluar su consistencia. En los casos necesarios, también deberá replantearse cambiar la velocidad de diseño y/o rediseñar el tramo.

Puesto que se trata de rediseñar una carretera existente, se espera que la actuación sobre unos pocos elementos de la misma tengan un gran impacto en la seguridad. Es por ello que no puede alterarse significativamente la misma, sino que deben ser cambios localizados con un gran efecto. Es por ello que, con tan pocos cambios en el diseño, en muchas ocasiones no sea posible alcanzar una consistencia buena. Por ello, en este tipo de procesos se permite ofrecer un rediseño que presente una consistencia aceptable.

5.3 Consideración en la fase de planeamiento

La adaptación de la metodología propuesta para la fase de planeamiento persigue fundamentalmente identificar qué posibles alternativas de las planteadas son más seguras. La mayor aportación de esta metodología consiste en que a través de los métodos de consistencia global es posible estimar el número de accidentes en los



próximos años, y así poder valorar objetivamente el nivel de seguridad, así como incorporarlo en el análisis multicriterio.

El primer paso de esta fase comienza desarrollando un conjunto de diversas alternativas, con bajo grado de definición, que cumplan la función perseguida para la nueva carretera. Se procederá a un prediseño de cada una de ellas, atendiendo a una primera tentativa de velocidad de diseño. A partir del mismo, se evaluará la consistencia de cada solución, empleando exclusivamente criterios globales. Las alternativas con un buen grado de consistencia podrán tomarse como definitivas, mientras que las que presenten una consistencia mala deberán ser tramificadas, siguiendo el proceso establecido para cada uno de sus segmentos diferenciados.

Gracias al análisis de la consistencia global, pueden estimarse los accidentes con víctimas para cada una de las alternativas. Para cada alternativa se deberá considerar dicha cifra, e incorporarla finalmente al análisis multicriterio, junto con otros objetivos, tales como el económico, la integración ambiental, etc., para la selección de la alternativa final propuesta.

6 Integración de la consistencia en la evaluación de la seguridad vial de carreteras en servicio

El análisis de consistencia también puede utilizarse para estimar el nivel de siniestralidad esperado en una carretera existente, así como identificar los puntos más conflictivos. De esta forma se puede determinar si la alta siniestralidad de una vía es debida al factor infraestructura (con lo que se procedería a su rediseño), o a otros factores.

Las carreteras actuales no fueron diseñadas considerando este tipo de evaluaciones en su diseño, por lo que pueden presentar gran disparidad de velocidades, redundando en una mayor siniestralidad. Por otra parte, en muchas ocasiones la velocidad de diseño no se ajusta a los requerimientos del tramo, posiblemente porque se diseñó sin efectuar una correcta tramificación.

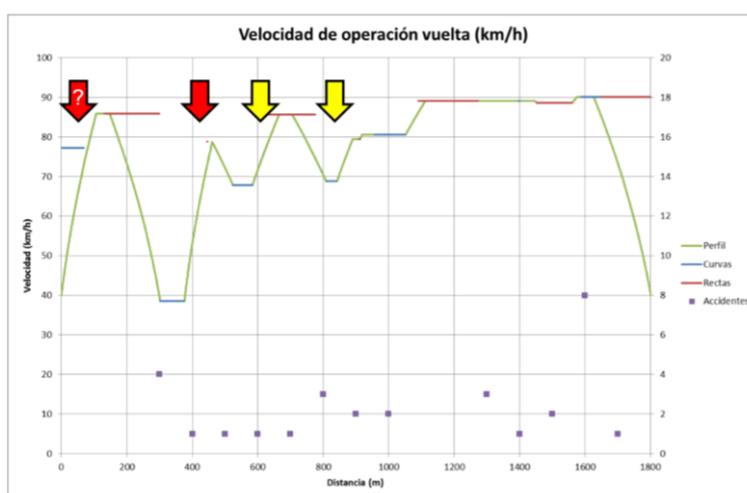


Figura 3. Aplicación del criterio II de Lamm para determinar las zonas de posible rediseño en un tramo de carretera



Los modelos de consistencia pueden ayudar a evaluar la seguridad vial de las carreteras existentes (figura 3). Los criterios globales podrían ayudar a estimar el número de accidentes, y así determinar si el tramo presenta una siniestralidad mayor que la media de la red de carreteras. En caso de ser mayor, debería plantearse su revisión geométrica, según lo expuesto anteriormente.

Independientemente de los criterios globales, los criterios locales y los inerciales pueden utilizarse para determinar las zonas en las que se produce una mayor violación de las expectativas ad hoc de los conductores. De esta forma se puede centrar la actuación sobre las zonas concretas a mejorar de la carretera.

7 Cierre

En el presente documento se muestra cómo puede utilizarse el concepto de consistencia para producir diseños de carreteras más seguros. Se ha indicado en primer lugar cómo puede integrarse directamente en el proceso de diseño, tanto en fase de proyecto como en fase de planeamiento. Igualmente, se ha hecho hincapié en el rediseño de carreteras existentes.

Posteriormente se ha indicado cómo puede utilizarse la consistencia para evaluar el nivel de seguridad en carreteras existentes.

8 Bibliografía

- [1] García, A. (2006). "Velocidad de proyecto vs. velocidad del proyecto". *Rutas: revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, No. 117, pág. 3.
- [2] Barnett, J. (1936). "Safe Side Friction Factors and Superelevation Design". *Highway Research Board, Proc.*, No. 16, pp. 69-80.
- [3] Donnell, E.T., Hines, S.C., Mahoney, K.M., Porter, R.J. y McGee, H. (2009). "Speed concepts: informational guide". Report No. FHWA-SA-10-001.
- [4] Wooldridge y otros (2003). "Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways". NCHRP Report 502. TRB.
- [5] Gibreel, G.M. y otros (1999). "State of the art of highway geometric design consistency". *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, No. 125(4), pp. 305-313.
- [6] Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J.M, y García García, A. (2013). "New Geometric Design Consistency Model Based on Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation". *Accident, Analysis and Prevention*, accepted DOI: 10.1016/j.aap.2012.10.001.
- [7] García, A., Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F.J. y Pérez-Zuriaga, A.M. (2013). "New Consistency Index Based on Inertial Operating Speed". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. (aceptado, pendiente de publicación).
- [8] AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. *Highway Safety Manual*. Washington, D.C., 2010.
- [9] Forschungsgesellschaft für Strassen y Verkehrswesen Linienführung. *RAS-L Richtlinien für die Anlage von Strassen*; Bonn, Germany, 1995.